

**EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA AL INCREMENTO SIMULTÁNEO DE LA  
CARGA HIDRÁULICA Y LA CARGA ORGÁNICA EN HUMEDALES DE FLUJO  
VERTICAL PARA TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS  
BAJO CONDICIONES TROPICALES**

**ANDREA NATALY ROZO FLÓREZ  
1088297497**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
FACULTAD DE TECNOLOGÍA  
ESCUELA DE QUÍMICA  
PROGRAMA DE QUÍMICA INDUSTRIAL  
PEREIRA  
2016**

**EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA AL INCREMENTO SIMULTÁNEO DE LA  
CARGA HIDRÁULICA Y LA CARGA ORGÁNICA EN HUMEDALES DE FLUJO  
VERTICAL PARA TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS  
BAJO CONDICIONES TROPICALES**

**ANDREA NATALY ROZO FLÓREZ  
1088297497**

**Trabajo de grado para optar al título de química industrial.**

**DIRECTOR:  
Ing. MSc. PhD DIEGO PAREDES CUERVO**

**GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN AGUA Y SANEAMIENTO (GIAS)  
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
FACULTAD DE TECNOLOGÍA  
ESCUELA DE QUÍMICA  
PROGRAMA DE QUÍMICA INDUSTRIAL  
PEREIRA  
2016**

**Nota de aceptación:**

---

---

---

---

---

**Ing. MSc. PhD Diego Paredes Cuervo**  
**Director de Investigación.**

---

**Jurado.**

---

**Jurado.**

**Pereira (Risaralda), 13 de marzo de 2.016.**

## **DEDICATORIA**

Al iniciar mi tesis de grado muchas ideas pasaron por mi mente para la realización de este trabajo. Pero acudí a la enseñanza más importante que me ofrecieron mis padres a lo largo de mi vida, los valores, y resalte el respeto, la pasión, la constancia, la paciencia y el amor por el trabajo bien hecho, elementos de suma importancia en la praxis de mi trabajo de grado y salían a flote en cada proceso realizado. Es por ello que este trabajo de grado lo quiero dedicar a mi madre Gloria Amparo Flórez, a mi padre Kilian Arturo Rozo, y a mi hermana Angie Melissa Rozo, por demostrarme cada día su apoyo incondicional, su enseñanzas para la vida, y la responsabilidad de crecer en el área personal y profesional.

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Ing. MSc. PhD. Diego Paredes Cuervo por creer en mi aprendizaje y dedicación, por convertirme en su discípula y moldearme en conocimiento que llevo en mí ser para la realización de mi vida profesional y laboral. Gracias doctor por tantas enseñanzas me siento privilegiada de contar con su apoyo profesional.

A la ing. MSc Eliana Bohórquez por las enseñanzas, consejos, apoyo incondicional, su dedicación y especialmente su paciencia en todo el proceso de investigación.

Al personal del Laboratorio de Procesos Biológicos por su acompañamiento, por brindarme sus experiencias y enseñanzas en el análisis de muestras. Además de las personas que me ayudaron en la adecuación de los humedales para la realización del estudio.

A los señores Víctor (Q.E.P.D.), German y Albeiro personal encargado de la planta de tratamiento de la Universidad Tecnológica de Pereira, por amable, gentil y dispuesta colaboración en el mantenimiento de los humedales y en la recolección de muestras.

## CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN .....	17
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	18
2. JUSTIFICACIÓN .....	19
3. OBJETIVOS .....	20
3.1 GENERAL .....	20
3.2 ESPECÍFICOS .....	20
4. MARCO TEÓRICO.....	21
4.1 AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA .....	21
4.2 PARÁMETROS DEL AGUA RESIDUAL.....	21
4.2.1 Temperatura. ....	21
4.2.2 Potencial de Hidrógeno (pH).....	22
4.2.3 Conductividad .....	22
4.2.4 Materia orgánica .....	22
4.2.5 Demanda bioquímica de oxígeno (DBO <sub>5</sub> ).....	22
4.2.6 Demanda química de oxígeno (DQO).....	22
4.2.7 Sólidos suspendidos totales (SST) .....	23
4.2.8 Nitrógeno total .....	23
4.2.9 Organismos patógenos.....	23

4.2.10	Caudal .....	23
4.3	BIODEGRADABILIDAD .....	23
4.4	TRATAMIENTO DESCENTRALIZADO PARA AGUAS RESIDUALES ....	24
4.5	HUMEDALES CONSTRUIDOS .....	25
4.5.1	Antecedentes.....	25
4.5.2	Tipos de humedales construidos .....	26
4.5.2.1	Humedales de flujo superficial (FS) .....	26
4.5.3.2	Humedales de flujo subsuperficial (FSS) .....	27
4.6	HUMEDALES CONSTRUIDOS DE FLUJO VERTICAL PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA.....	28
4.6.1	Diseño y operación de humedales construidos de flujo vertical.....	28
4.6.2	Carga hidráulica.....	29
4.6.3	Carga orgánica .....	29
4.6.4	Obstrucción del humedal por carga hidráulica y carga orgánica .....	30
4.6.5	Material vegetal .....	30
4.6.5.1	<i>Heliconia psittacorum</i> .....	31
4.6.6	Medio de soporte de los humedales construidos de flujo vertical .....	31
4.6.7	Remoción de contaminantes .....	32
4.7	TASA DE CONSUMO DE OXÍGENO (TCO) .....	34
4.8	MARCO LEGAL.....	34
5.	METODOLOGÍA.....	35
5.1	UNIDADES EXPERIMENTALES.....	35
5.2	DISEÑO EXPERIMENTAL .....	37

5.2.1	La carga hidráulica .....	38
5.2.2	La carga orgánica .....	39
5.2.3	La presencia o ausencia e <i>Heliconia Psittacorum</i> .....	39
5.3	OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LAS UNIDADES .....	40
5.3.1	Limpieza de los humedales .....	40
5.3.2	Control en el suministro del caudal .....	40
5.3.3	Recolección de muestra .....	41
5.4	PARÁMETROS ANALIZADOS .....	41
5.5	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	42
5.6	TASA DE CONSUMO DE OXÍGENO (TCO) .....	44
5.7	LA CONSTANTE DE VELOCIDAD DE ELIMINACIÓN (K) .....	45
5.8	ANÁLISIS ESTADÍSTICO .....	46
6.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	47
6.1	CARACTERÍSTICAS DEL AGUA RESIDUAL .....	47
6.2	ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS .....	48
6.2.1	pH .....	48
6.2.2	Temperatura .....	49
6.2.3	Conductividad Eléctrica .....	50
6.3	REMOCIÓN DE CONTAMINANTES .....	51
6.3.1	Remoción de materia orgánica .....	51
6.3.1.1	Remoción de DQO .....	51
6.3.1.2	Remoción de DBO <sub>5</sub> .....	53



6.3.1.3	Influencia de la <i>Heliconia psittacorum</i> en la remoción de materia orgánica .....	54
6.3.2	Remoción de sólidos suspendidos totales (SST).....	55
6.3.3	Remoción de nitrógeno amoniacal .....	57
6.3.4	Formación de nitratos .....	59
6.3.5	Proceso de desnitrificación .....	63
6.3.6	Remoción de nitrógeno total .....	64
6.4	Tasa de consumo de oxígeno (TCO).....	66
6.5	Remoción de patógenos .....	66
6.7	Colmatación de los humedales.....	68
6.8	¿Cuál es el sistema óptimo?.....	72
7.	CONCLUSIONES.....	76
8.	RECOMENDACIONES .....	78
	BIBLIOGRAFÍA .....	79

## LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Clasificación de los sistemas naturales de aguas residuales.....	24
Tabla 2. Descripción de los tratamientos. ....	37
Tabla 3. Carga hidráulica suministrada a los humedales de flujo vertical y el número de pulsos .....	39
Tabla 4. Toma de muestra .....	39
Tabla 5. Requerimientos y almacenamiento de muestras de agua .....	41
Tabla 6. Método de análisis de parámetros fisicoquímicos.....	42
Tabla 7 Método de análisis parámetros. ....	42
Tabla 8. Límites Máximos Permisibles en los Vertimientos Puntuales. ....	44
Tabla 9. Características del agua residual doméstica a tratar. ....	48
Tabla 10. Cargas de DQO y concentraciones del afluente y efluente en las diferentes cargas hidráulicas y orgánicas aplicadas. ....	52
Tabla 11. Cargas DBO <sub>5</sub> y concentraciones del afluente y efluente en las diferentes cargas hidráulicas y orgánicas aplicadas .....	54
Tabla 12. Cargas de SST y concentraciones del afluente y efluente en las diferentes cargas hidráulicas y orgánicas aplicadas. ....	56
Tabla 13. Cargas de N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> y concentraciones del afluente y efluente para las diferentes cargas hidráulicas y orgánicas aplicadas. ....	58
Tabla 14. Tasa de consumo de oxígeno en las diferentes carga hidráulicas y orgánicas aplicadas .....	66
Tabla 15. Constante de velocidad de eliminación de los diferentes contaminantes a las diferentes cargas hidráulicas y orgánicas aplicadas. ....	70
Tabla 16. Cargas optimas de los humedales flujo vertical para la remoción de DQO Y SST según la normativa 0631 .....	72

Tabla17. Cargas optimas de los humedales flujo vertical para la remoción de DBO <sub>5</sub> , N.NH <sub>3</sub> <sup>+</sup> , N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , NT .....	73
--	----

## LISTA DE ILUSTRACIONES

	pág.
Ilustración 1. Humedal de flujo superficial.....	27
Ilustración 2. Humedal de flujo subsuperficial horizontal. ....	27
Ilustración 3. Humedal de flujo subsuperficial vertical.....	28
Ilustración 4. Descripción del proceso de obstrucción del medio en humedales flujo vertical. ....	30
Ilustración 5. <i>Heliconia Psittacorum</i> . ....	31
Ilustración 6. Transformación de los diferentes contaminante en el humedal.....	32
Ilustración 7. Esquema de los humedales de tratamiento.....	35
Ilustración 8. Humedales piloto. ....	36
Ilustración 9. Comportamiento del pH en los diferentes tratamientos .....	49
Ilustración 10. Comportamiento de la temperatura en los diferentes tratamientos .....	50
Ilustración 11. Comportamiento de la conductividad en los diferentes tratamientos .....	51
Ilustración 12. Porcentaje de remoción de la materia orgánica a las diferentes cargas hidráulicas y orgánicas aplicadas.....	55
Ilustración 13. Porcentaje de remoción de SST para las diferentes cargas hidráulicas y orgánicas aplicadas. ....	56
Ilustración 14. Porcentaje de remoción de $\text{N-NH}_4^+$ para los diferentes cargas hidráulicas y orgánicas aplicadas. ....	58
Ilustración 15. Comportamiento del nitrógeno a una C.H de 0.15 m / d y una C.O de 22 g / m <sup>2</sup> d (concentración 136 mg DBO <sub>5</sub> / L). ....	61
Ilustración 16. Ccomportamiento del nitrógeno a una C.H de 0.38 m / d y una C.O de 59 g / m <sup>2</sup> d (concentración 159 mg DBO <sub>5</sub> / L). ....	61

Ilustración 17. Comportamiento del nitrógeno a una C.H de 0.61 m / d y una C.O de 129 g / m <sup>2</sup> d (concentración 210 mg DBO <sub>5</sub> / L). .....	62
Ilustración 18. Comportamiento del nitrógeno a una C.H de 0.84 m / d y una C.H de 258 g / m <sup>2</sup> d (concentración 302 mg DBO <sub>5</sub> / L).....	62
Ilustración 19. Esquema de nitrificación y desnitrificación. ....	63
Ilustración 20. Porcentaje de remoción NT en los diferentes cargas hidráulicas y orgánicas aplicadas. ....	64
Ilustración 21. Concentración del NT en el afluente y en los efluentes en las diferentes cargas hidráulicas y orgánicas aplicadas. ....	65
Ilustración 22. Remoción de coliformes fecales y <i>E.coli</i> en unidades logarítmicas. ....	67
Ilustración 24. Proceso de colmatación a las diferentes cargas aplicadas en el humedal. ....	68

## LISTA DE REACCIONES

	pág.
Reacción 1. Global de la nitrificación .....	60
Reacción 2. Proceso de desnitrificación empelando como fuente principal de carbono el metanol. ....	64

## LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Calculo del caudal basado en la carga orgánica superficial.....	38
Ecuación 2. Carga hidráulica .....	38
Ecuación 3. Eficiencia de remoción. ....	43
Ecuación 4. Carga contaminante removida. ....	43
Ecuación 5. Tasa de consumo de oxigeno .....	45
Ecuación 6. Constante de velocidad.....	45

## RESUMEN

El presente estudio se llevó a cabo en las instalaciones de la planta de tratamiento de agua residual de la Universidad Tecnológica de Pereira, en un periodo de tiempo de nueve (9) meses aproximadamente. Tiempo en el cual se llevaron procesos de evaluación del aumento de la carga hidráulica superficial, la carga orgánica y la presencia o ausencia de la *Heliconia psittacorum* en los humedales de flujo subsuperficial vertical, para la remoción de contaminantes presentes en el agua residual doméstica. Las cargas hidráulicas y cargas orgánicas empleadas a lo largo del estudio fueron de: (0.15, 0.38, 0.61 y 0.84) m / d y (22, 59.3, 129 y 258) g / m<sup>2</sup>d, respectivamente.

Los resultados del humedal plantado con *Heliconia psittacorum* muestran que a altas cargas hidráulicas y orgánicas (C.H 0.84 m / d y C.O de 258 g / m<sup>2</sup> d) se evidencia la eficiencia de la remoción de DQO (63% con carga removida de 214 g / m<sup>2</sup> d), SST (74% con carga removida de 62.2 g / m<sup>2</sup> d), N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (70% con carga removida de 82 g / m<sup>2</sup> d), y nitrógeno total NT (69% con carga removida de 80 g / m<sup>2</sup> d). En cuanto al humedal sin plantar, se refleja que fue eficiente hasta una (C.H 0.61 m / d y C.O 129 g / m<sup>2</sup> d) en la remoción de DQO (79% con carga removida de 180 g / m<sup>2</sup> d), SST (62% con carga removida de 35 g / m<sup>2</sup> d), N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (70% con carga removida de 55 g / m<sup>2</sup> d), y nitrógeno total NT (63% con carga removida de 50 g / m<sup>2</sup> d).

En la remoción de *E. coli* y coliformes fecales los humedales fueron más eficientes a la menor carga aplicada (C.H 0.15 m / d C.O de 22 g / m<sup>2</sup> d) con remoción de hasta de 1,5 unidades logarítmicas en coliformes fecales y 1,3 en *E. coli*, tanto en el humedal plantado con *Heliconia psittacorum*, como en el humedal sin plantar.

**Palabras claves** humedal de flujo subsuperficial vertical, carga orgánica, carga hidráulica, *Heliconia psittacorum*.



## INTRODUCCIÓN

El deterioro del agua, por los inmoderados vertimientos a los cuerpos de agua, que provienen de las diferentes actividades humanas e industriales vienen originando diferentes problemas de salubridad, medioambientales y limitación del recurso hídrico; desmejoramiento así la calidad de vida de los seres vivos (Jimenez y Zárate, 2008).

Las aguas residuales en Colombia según el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (2011), se tratan en un porcentaje del nueve por ciento (9%). Siendo las zonas rurales las más afectadas por la ausencia del gobierno, falta de políticas públicas y la escasez de recursos técnicos y económicos. Frente a este panorama se están implementado diferentes tecnologías no convencionales descentralizadas de tratamiento de aguas residuales que sean de bajos costos y requerimientos sencillos de operación y mantenimiento (construcción de humedales de flujo vertical), (Delgadillo, 2008).

Entre las distintas tecnologías no convencionales, aparecen los humedales contruidos de flujo vertical, que hoy en día se conocen como una solución fiable, eficaz y viable en el campo del tratamiento de aguas residuales domésticas (Stefanakis y Tsihrintzis, 2012), obteniendo efluentes con mejor calidad, debido principalmente a interacciones físicas, químicas y biológicas, que ocurren al interior del humedal, a través de las cuales, el agua residual afluente es depurada progresivamente (Salgot & Torrens, 2008), reduciendo los posibles efectos adversos de los vertimientos sobre el medio receptor (Llagas & Guadalupe, 2006).

En este proyecto de investigación se implementó el uso de dos humedales contruidos de flujo vertical para climas tropicales; Uno de ellos plantado con *Heliconia psittacorum* y el otro sin plantar. Esta idea de investigación se llevó a cabo, gracias a que a la fecha existen pocos estudios sobre humedales en estas condiciones tropicales. De igual manera, se tuvo en cuenta las características propias de estos humedales entre otras destacamos: que son resiten a altas tasas de cargas hidráulicas y orgánicas, además no requieren de un área de superficie de gran tamaño, presentan pocos problemas a la hora de contagios de plagas y olores, y por último se considera un tratamiento adecuado para aguas residuales en zonas distantes. Así mismo, se evaluó la eficiencia de remoción de contaminantes presentes en las aguas residuales domésticas bajo diferentes condiciones de operación (variación de la carga hidráulica superficial y su consecuente variación de carga orgánica).

## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En los países de clima tropical como Colombia, la mayor parte de las aguas residuales domésticas no son tratadas o son inadecuadamente tratadas y se vierten directamente al suelo y a los cuerpos de agua superficiales (ríos, lagos y mares), especialmente en las zonas rurales, generando dos tipos de problemas: 1- salud pública y 2- la afectación ambiental (Campos y Lopera, 2011).

Según el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (2011), aproximadamente el 9% de las aguas residuales son tratadas por tecnologías convencionales, en las cabeceras municipales del país afectando el equilibrio del ecosistema e incrementando la contaminación hídrica y limitando el uso del agua.

La ingesta de agua directa o indirecta de fuentes contaminadas, causan un elevado riesgo de infección parasítica (amebiasis, teniasis, ascariasis), vírica (hepatitis, diarreas) y bacteriana (cólera, tifoidea, y Enfermedad Diarreica Aguda EDA en general) (Campos y Lopera, 2011).

Existen muchas investigaciones sobre el uso de humedales construidos, sea de flujo horizontal o vertical; sin embargo, esos estudios han sido elaborados en países desarrollados (Estados Unidos, Alemania), de climas diferentes al tropical, con vegetación nativa de esas zonas climáticas y utilizando otros elementos particulares; sin embargo en Colombia, un país que se encuentra ubicado en una zona tropical, los estudios en humedales son escasos. Además del comportamiento de la vegetación nativa (*Heliconia psittacorum*) no existen muchas referencias, siendo necesario realizar más estudios e investigaciones al respecto.

## 2. JUSTIFICACIÓN

En Colombia se necesitan sistemas alternativos para enfrentar la problemática del tratamiento de aguas residuales domésticas, agrícolas e industriales; por tal motivo, los humedales construidos de flujo vertical pueden ser de gran importancia en la mejora de la purificación de los ríos, lagos y en particular ayudan como sistema descentralizado en zonas rurales o sub-urbanas. Su construcción y operación es de bajo costo, ya que se elaboran con materias primas nativas de esta zona, teniendo en cuenta la fácil localización de la planta (*Heliconia psittacorum*), como también las características climáticas del sitio, y las restricciones de la calidad de vertido de aguas tratadas exigidas por autoridades locales.

La implementación de especies de plantas nativas en los humedales es interesante, porque pueden contribuir a la remoción de contaminantes, entre ellas está la *Heliconia psittacorum*, que es una especie típica regional con posible potencial para propiciar condiciones aerobias al interior del sistema y promover procesos de nitrificación y oxidación de materia orgánica (Nivala et al., 2013).

La efectividad del tratamiento en los humedales construidos de flujo vertical dependen de varios parámetros de diseño y operación; entre ellos se encuentran la carga hidráulica y la carga orgánica, debido a que los humedales soportan una carga máxima de estos parámetros, de lo contrario podrían colmatarse o disminuir su capacidad depuradora. Las guías de diseño de humedales verticales tienen definidos esos parámetros en países como Estados Unidos, Dinamarca y Austria a diferencia de países tropicales, en los que poco se han abordado. Por lo anterior es de suma importancia estudiarlos en condiciones de clima tropical.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1 GENERAL**

Evaluar la respuesta ante el incremento simultáneo de la carga hidráulica y la carga orgánica en el desempeño de humedales de flujo vertical para tratamiento de aguas residuales domésticas bajo condiciones tropicales.

#### **3.2 ESPECÍFICOS**

- ✓ Determinar el comportamiento de la remoción de materia orgánica y nitrógeno en aguas residuales domésticas ante el incremento de las cargas hidráulica y orgánica, aplicadas en humedales de flujo vertical en climas tropicales.
- ✓ Determinar la respuesta en la remoción de microorganismos patógenos en aguas residuales domésticas, ante el incremento de las cargas hidráulica y orgánica aplicadas en humedales de flujo vertical en climas tropicales.
- ✓ Establecer el efecto de la presencia de vegetación sobre la eficiencia de remoción de contaminantes típicos de aguas residuales domésticas en humedales de flujo vertical bajo las condiciones dadas.

## **4. MARCO TEÓRICO**

### **4.1 AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA**

Las aguas residuales domésticas se consideran líquidos provenientes de las actividades humanas en las viviendas, edificios comerciales e institucionales (Báez, 1995); estas contienen sustancias cuya estructura química están compuestas principalmente de carbono, hidrogeno, oxígeno y nitrógeno; como son las proteínas (40-60%), e hidratos de carbono (25-50%), procedentes de las heces humanas o de los desechos de productos alimentarios, los aceites y las grasas (10%) que son altamente estables, inmiscibles con el agua y son procedentes de los desperdicios alimentarios (Metcalf y eddy, 1995).

Estos contaminantes orgánicos son altamente biodegradables por los microorganismos en condiciones aerobias (Ministerio del Medio Ambiente. Guía para la gestion, manejo, tratamiento y disposición final de las aguas residuales minicipales, 2002).

Otros contaminantes habituales son los sólidos y el nitrógeno siendo este último uno de los principales contaminantes que causan el deterioro de las masas acuáticas, (pueden provocar eutrofización y descenso de los niveles de oxígeno). Por último, están los agentes patógenos, principalmente los coliformes fecales que son indicadores de contaminantes biológicos, estos pueden ir en mayor o menor cantidad en las aguas residuales domésticas y son capaces de producir o transmitir enfermedades (Metcalf y eddy, 1995).

### **4.2 PARÁMETROS DEL AGUA RESIDUAL**

**4.2.1 Temperatura.** La temperatura del agua residual por lo general, es mayor que la temperatura del agua potable, debido a la incorporación de agua caliente proveniente del uso doméstico. La temperatura del agua es un parámetro físico muy importante, ya que afecta directamente las reacciones químicas y las velocidades de reacción, la vida acuática, la concentración de oxígeno disuelto y la adecuación del agua para fines benéficos.

La temperatura óptima para el desarrollo de la actividad bacteriana está en el rango de 25 a 30 °C (Crites y Tchobanoglous, 2000).

**4.2.2 Potencial de Hidrógeno (pH).** El potencial de Hidrógeno del agua medido en unidades de pH, es de suma importancia ya que se ve influenciado por factores bióticos, abióticos, y bioquímicos del sistema. El pH está relacionado con la acidez o la alcalinidad de las diferentes sustancias presentes en el agua residual doméstica, principalmente a la presencia de anhídrido carbónico, producido por la mineralización total de la materia orgánica. (Londoño y Marín, 2009).

**4.2.3 Conductividad.** La conductividad es una medida indirecta de la cantidad de sales o sólidos disueltos que tiene el agua. Los iones en solución tienen cargas positivas y negativas; esta propiedad hace que la resistencia del agua al flujo de corriente eléctrica tenga ciertos valores. (Ingeniería de Tratamiento Acondicionamiento de Aguas, 2000).

**4.2.4 Materia orgánica.** Los parámetros medidores de materia orgánica presentes en el agua residual doméstica son la DBO<sub>5</sub> y La DQO; la influencia de estos dos parámetros; determinan la calidad del agua (si es o no biodegradable) y las posibilidades de tratamiento debido a que se basan en la cantidad de oxígeno necesario para descomponer y oxidar los productos orgánicos (Ramalho, 2003).

**4.2.5 Demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>).** Es el parámetro que se maneja para tener una medida de la materia orgánica biodegradable. Por lo tanto, la DBO<sub>5</sub> representa la cantidad de oxígeno consumido por microorganismos, en reacciones energéticas de respiración, metabolismo y reproducción celular, necesarias para la descomposición biológica aeróbica de la materia orgánica biodegradable del agua (Ramalho, 2003).

La DBO<sub>5</sub> se calcula midiendo la disminución en la concentración de oxígeno disuelto del agua después de incubar una muestra, durante 5 días a 20°C. La reacción se lleva a cabo en la oscuridad, para evitar la producción de oxígeno por las algas, a una disolución adecuada, y manteniendo el pH entre 7-7.5 (Crites y Tchobanoglous, 2000).

**4.2.6 Demanda química de oxígeno (DQO).** Es un parámetro analítico de contaminación. Se expresa como la cantidad de oxígeno equivalente necesario para la oxidación química de la materia orgánica total (biodegradable y no biodegradable) de un agua residual (Romero, 1999).

La DQO se expresa en mgO<sub>2</sub> / L. En esta medida se sustituye a los microorganismos por un agente químico como el dicromato o el permanganato de potasio en medio ácido (Crites y Tchobanoglous, 2000).

**4.2.7 Sólidos suspendidos totales (SST).** Los sólidos están compuestos por materia flotante y en suspensión, en dispersión coloidal y en disolución. Los sólidos suspendidos totales son un parámetro fundamental para definir la calidad del agua que se está tratando, y se definen como: el residuo no filtrable de una muestra de agua residual doméstica, el cual es retenido por un filtro de fibra de vidrio que posteriormente se seca a 103-105 °C, hasta obtener un peso constante. (Crites y Tchobanoglous, 2000).

**4.2.8 Nitrógeno total.** El Nitrógeno puede hallarse presente en aguas residuales en cuatro estados de oxidación: nitratos, nitritos, nitrógeno amoniacal y nitrógeno orgánico. Todas estas formas de nitrógeno más el nitrógeno gaseoso son interconvertibles unos con otros, con la intervención de bacterias existentes en el medio acuático (Vymazal, 2007)

**4.2.9 Organismos patógenos.** Los principales organismos presentes en el agua residual son las bacterias, virus y protozoarios. Estos organismos bacterianos patógenos, excretados por el hombre, causan enfermedades del aparato intestinal como fiebre tifoidea, disentería, diarrea, cólera, entre otras (Reinoso y Bécares, 2008).

Los microorganismos patógenos fáciles de aislar e identificar son los coliformes, puesto que su presencia es más numerosa y fácil de comprobar (Reinoso y Bécares, 2008); especialmente el *Escherichia coli*, que es el principal indicador de contaminación fecal de origen humano o animal (Grant, 1996). Las unidades en las cuales son recomendadas expresarse son: UFC / mL (Grant, 1996.).

**4.2.10 Caudal.** Una de las variables que más interesan es el caudal, puesto que a través de él se cuantifican consumos, se evalúa la disponibilidad del recurso hídrico y se planifica la gestión necesaria. El caudal  $Q$ , se define como: el volumen de agua que pasa por una sección en un determinado tiempo  $t$ , es decir:  $Q = v / t$  (Londoño y Marín, 2009).

### 4.3 BIODEGRADABILIDAD

La biodegradabilidad es la característica más relevante del agua residual, ya que gran parte de las sustancias que transporta el agua residual, sea disuelta, suspendida o coloidal, es materia orgánica. De esta característica dependerá la viabilidad de aplicar o no un tratamiento de tipo biológico, debido a que los microorganismos utilizan estas sustancias como fuente de alimento y fuente de energía para su metabolismo y reproducción.

La medida de biodegradabilidad o tasa de degradación de un compuesto orgánico es determinada a través de la relación  $DBO_5 / DQO$ , entre la proporción de materia orgánica biodegradable sobre materia orgánica total (Area et al, 2013).

#### 4.4 TRATAMIENTO DESCENTRALIZADO PARA AGUAS RESIDUALES

El tratamiento de agua residual es el conjunto de operaciones unitarias de tipo físico, químico o biológico, que con una adecuada combinación, da como resultado la eliminación o reducción de la contaminación o las características no deseables de las aguas (Altamarino, 2009). Los sistemas de tratamiento de agua residual descentralizados son los que recogen, disponen y reúsan el agua residual de hogares individuales, grupos de viviendas, comunidades aisladas e industrias; además de ser aquel que trata el agua residual cerca del punto de generación de la misma (CDWT, 2009). Debido a estas particularidades ellos generan un potencial de reúso de las aguas residuales, capacidad de tratamiento mayor, reducción de costo del sistema de tratamiento; así mismo, desde el punto de vista ambiental, causa menos impacto en las descargas de los efluentes, generando menos contaminación (García y Corzo, 2008).

Estas tecnologías descentralizadas han desarrollado una serie de sistemas basados en los mecanismos de depuración existentes en la naturaleza (Mena, 2008); Entre estos sistemas naturales de depuración de agua residual se encuentran las lagunas de oxidación, los filtros verdes, los humedales naturales y los construidos. Los sistemas naturales pueden clasificarse en dos categorías según el tratamiento que tenga lugar fundamentalmente en el terreno o en una masa de agua (Tabla 1).

Tabla 1. Clasificación de los sistemas naturales de aguas residuales

SISTEMAS NATURALES DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES				
Basados en la aplicación del agua en el terreno		Basados en los procesos que suceden en la masa de agua		
Aplicación sub-superficial	Aplicación superficial	sistema con plantas flotantes	lagunaje natural	humedales construidos de flujo superficial
zanjas y lechos filtrantes, humedales construidos de flujo sub-superficial	filtros verdes, infiltración - percolación, filtros de arena			

(García y Corzo, 2008).



## 4.5 HUMEDALES CONSTRUIDOS

Entre las distintas tecnologías descentralizadas, los humedales construidos son los que están experimentando un mayor grado de desarrollo e implantación, resultando una opción viable a la hora de obtener agua con una mejor calidad, debido principalmente a su elevada eficiencia en la disminución de materia orgánica, nutrientes y patógenos, reduciéndose los posibles efectos adversos de los vertimientos sobre el medio receptor (Llagas y Guadalupe, 2006), especialmente en zonas rurales donde existen a menudo limitaciones financieras y de gestión, falta de recursos técnicos para desarrollar sistemas convencionales de tratamiento de agua residual (Salgot y Torrens, 2008).

**4.5.1 Antecedentes.** Las primeras nociones científicas se remontan a 1946 en el Instituto Max Planck (Wei y Guodong, 2012), de Alemania, donde el Dr. Käthea Seidel, implementó el uso de humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales, en el que señala las posibilidades que tienen las plantas emergentes para la remoción de una serie de sustancias tanto orgánicas como inorgánicas, así como la eliminación de bacterias presentes en las aguas residuales (U.S. EPA, 2000). En los años setenta, desarrolló un sistema conocido como *Proceso del Instituto Max Planck*, que consistió de varias etapas en las que se combinaba humedales de flujo vertical y humedales de flujo horizontal (Bastian, 1993).

En Alemania, el Dr. Reinhold Kichuth desarrolló un sistema que llamó *Método de Zona de Raíces*, que consistía en el diseño de estanques rectangulares con un lecho de suelo específico, en los que se sembraba *Phragmites australis* y el flujo de agua residual era subsuperficial horizontal (Wei y Guodong, 2012).

En Inglaterra en 1985 se puso en operación el primer sistema de tratamiento de aguas residuales mediante el uso de humedales construidos; existen alrededor de 5.000 humedales construidos en Bélgica, Holanda, Hungría y Suecia (Stottmeister, 2003).

En el caso de los Estados Unidos, se iniciaron a finales de 1960; y para el 2004 se reportó la existencia de 1.000 humedales construidos que están en funcionamiento para el tratamiento de aguas residuales y en algunos casos para el mantenimiento de los hábitats (U.S. EPA, 2004).

En Colombia se han realizado diferentes estudios para evaluar la utilización de humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales, en especial de flujo subsuperficial, enfocados primordialmente a la realización de pruebas piloto en el tratamiento de agua residual doméstica con caudales y poblaciones de diseño relativamente pequeñas (Díaz, 2014), entre ellos están: Lara en 1997, en la ciudad de Tunja, construyó un humedal, como un sistema de tratamiento complementario de agua residual doméstica tratada previamente en un reactor

anaerobio UASB (Díaz, 2014); en 2004 en Cogua, Cundinamarca, la Universidad Javeriana construyó un humedal piloto (Lara, 2004); en Bogotá, la Universidad Nacional ha trabajado un prototipo de humedal construido de configuración simple y eficiente denominado “HUMEDAR – I ®” (Otálora, 2011) y la Escuela Colombiana de Ingeniería, diseñó un humedal piloto de flujo subsuperficial horizontal, construido con medio poroso de carbón mineral y una vegetación macrófita de tipo ornamental *Zantedeschia aethiopica* (Díaz y Romero, 2013).

Desde el año 2009 la Universidad Tecnológica de Pereira, ha implementado varios estudios sobre humedales de flujo subsuperficial: el de la vereda La Bananera del municipio de Pereira, donde lo implementó como tratamiento complementario para el tratamiento de aguas residuales domésticas. (Arroyave y Castaño, 2009); El Grupo de Investigación en Agua y Saneamiento, ha trabajado en estudios para evaluar la eficiencia y factibilidad de la utilización de algunos tipos de humedales en pequeñas comunidades del municipio; entre estos se encuentra: Los humedales piloto sembrados con la especie *Phragmites australis*, para el estudio de la eficiencia de remoción de materia orgánica (Londoño y Marín, 2009), en 2011 implementaron dos humedales de flujo subsuperficial plantado con *Phragmites* sp y sin plantar, empleando como matriz suelo y un humedal flotante, como una alternativa tecnológica de fitorremediación para el tratamiento de aguas contaminadas con hidrocarburos (HC) procedente del petróleo (Cubillos, 2011); En el 2015, se implementaron ocho humedales de flujo subsuperficial vertical a escala piloto y se evaluó la influencia del medio filtrante, la frecuencia de alimentación como la presencia de la planta tropical *Heliconia psittacorum* en el tratamiento de Aguas Residuales Domésticas. (Bohórquez, 2015).

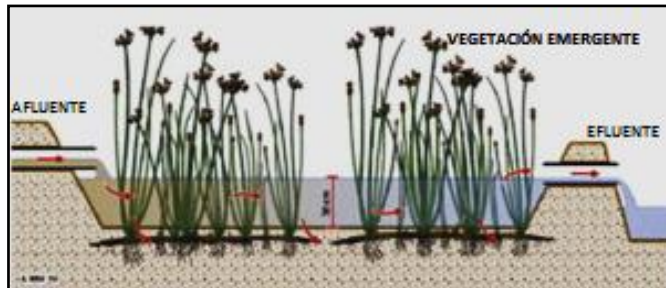
Entre estos y otros estudios que se han llevado a cabo, hasta el momento han arrojado buenos resultados en el rendimiento de remoción para el tratamiento de aguas residuales, implementando diferentes diseños de humedales construidos.

**4.5.2 Tipos de humedales construidos.** Existen dos, los de flujo superficial y los de flujo subsuperficial, cuyo modo de actuación, aun basándose en los mismos principios biológicos, son diferentes según el tipo de flujo (Saeeda y Sunc, 2012).

**4.5.2.1 Humedales de flujo superficial (FS).** Pueden albergar distintos tipos de vegetación macrófita, ya sea emergente, flotante o sumergida (U.S.EPA, 2000); son ideales para la creación de nuevos hábitats para la fauna y flora, o para mejorar las condiciones de terrenos pantanosos naturales próximos (Moreno, 2003).

Ellos son diseñados con cargas superficiales bajas, estos son utilizados principalmente para tratamientos terciarios y, en algunos casos, para secundarios; por este motivo se suelen aplicar para mejorar la calidad de efluentes que ya han sido previamente tratados en una depuradora (García y Corzo, 2008).

Ilustración 1. Humedal de flujo superficial.

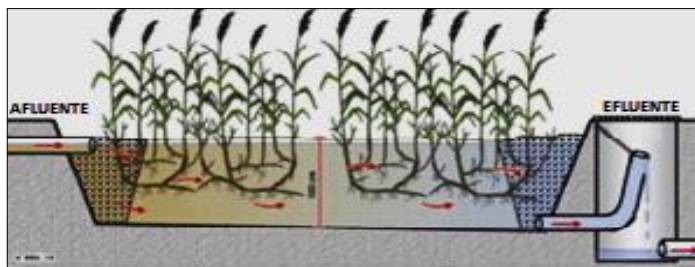


(Wua, 2015).

**4.5.1.3 Humedales de flujo subsuperficial (FSS).** Pueden ser una mejor opción para recibir aguas residuales parcialmente tratadas, debido a que el agua circula a través del medio poroso, de este modo se evitan problemas como posibles plagas de insectos, olores y, en climas fríos aportan una mayor protección térmica (Salgot y Torrens, 2008). En función del sentido de circulación se clasifican en humedales de flujo horizontal y vertical (Mena, 2008).

- ✓ **Humedales subsuperficiales de flujo horizontal.** En estos humedales el agua circula de manera horizontal, se caracterizan por funcionar permanentemente inundados y con cargas de alrededor de  $6 \text{ g DBO}_5/\text{m}^2\text{día}$  (García y Corzo, 2008). Este tipo de humedal presenta limitación de oxígeno, debido a que la vegetación no puede aportar con las raíces la cantidad de oxígeno necesaria para llevar el proceso de nitrificación de forma importante, aunque si lo es para el proceso de desnitrificación (Salgot y Torrens, 2008).

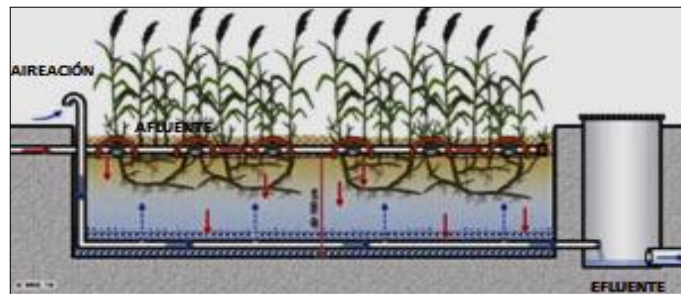
Ilustración 2. Humedal de flujo subsuperficial horizontal.



(Wua, 2015).

- ✓ **Humedales subsuperficiales de flujo vertical.** En estos humedales el agua fluye periódicamente a través del medio poroso lo que proporciona altos niveles de transferencia de oxígeno dentro del medio, optimizando así los diferentes tipos de tratamiento: físico (filtración), químico (oxidación) y biológico (fijación de la biomasa); posteriormente, se recoge en una red de drenaje situada en el fondo del lecho (Salgot y Torrens, 2008).

Ilustración 3. Humedal de flujo subsuperficial vertical



(Wua, 2015).

#### 4.6 HUMEDALES CONSTRUIDOS DE FLUJO VERTICAL PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA

Los humedales construidos de flujo vertical son extremadamente eficientes en la remoción de sólidos suspendidos, demanda biológica de oxígeno ( $DBO_5$ ), eficientes en la nitrificación de amonio (Arias y Brix, 2005) así como en la remoción de niveles significativos de metales, compuestos orgánicos y patógenos (Siachoque, 2009).

**4.6.1 Diseño y operación de humedales construidos de flujo vertical.** La efectividad del tratamiento de agua residual doméstica en los humedales construidos de flujo vertical depende de varios parámetros de diseño y operación. Los Parámetros para el diseño de humedales incluyen la carga hidráulica, carga orgánica, la selección del material vegetal, el material de sustrato, la fuente de aguas residuales y la calidad (Kadlec y Wallace, 2009). Pueden ser cruciales para establecer un sistema viable y lograr resultados de tratamiento sostenible.

**4.6.2 Carga hidráulica.** Es de gran importancia conocer la carga hidráulica óptima para humedales contruidos de flujo vertical (Wua, 2015) como la sobrecarga de las mismas, dependiendo del control de la alimentación y de la renovación del oxígeno dentro del medio (Turon et al, 2009). Lo anterior con el fin de lograr un buen funcionamiento, factibilidad y durabilidad del humedal de flujo vertical en la depuración del agua residual doméstica, para evitar así: la obstrucción del medio, el corto circuito en la alimentación y la disminución en la capacidad de eliminación en la mayoría de los parámetros DQO, DBO<sub>5</sub>, SST, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> NT y microorganismos patógenos (Nivala et al, 2012).

La tasa de carga hidráulica es equivalente a la velocidad que tiene el agua residual al pasar por el área superficial del humedal (Kadlec y Knight, 1995). El aumento de carga hidráulica promueve el paso más rápido de las aguas residuales a través del lecho, reduciendo así el tiempo de contacto óptimo en los procesos de remoción (Saeeda y Sunc, 2012). Pero si la carga hidráulica disminuye se aumenta el tiempo de contacto óptimo y el proceso de remoción (Yan y Xu, 2014).

Las tasas de carga hidráulica recomendadas por Arias y Brix, (2005) son de 0,05 - 0,06 m/día, pero en regiones tropicales estas tasas son generalmente más altas (Dan et al, 2011).

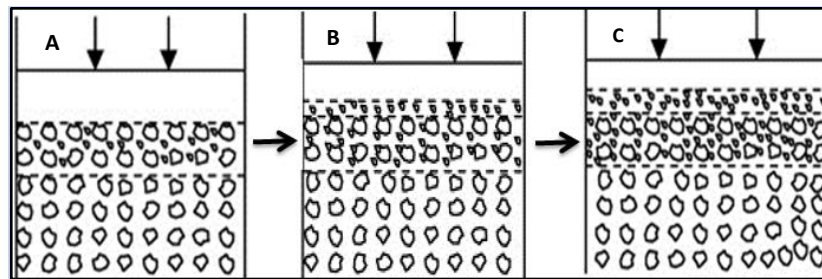
En los humedales de flujo vertical se recomienda alimentar en forma de carga intermitente, es decir dividiendo el afluente en varias oleadas individuales, ya que puede mejorar la eliminación de la materia orgánica, la eliminación de nitrógeno, (Saeeda y Sunc, 2012), impulsar la difusión del oxígeno atmosférico en el interior de los medios de soporte y minimiza el riesgo de obstrucción del medio (Gervin y Brix, 2001). La carga intermitente de frecuencia recomendada para los humedales de flujo subsuperficial vertical es de 8-12 pulsos / día. (Arias y Brix, 2005).

**4.6.3 Carga orgánica.** Se expresa como la velocidad a la que se suministra al humedal la materia orgánica disuelta DBO<sub>5</sub> g / m<sup>2</sup> d. Entre mayor sea la carga orgánica, mayor será la relación de alimento con los microorganismos y más rápido crecerán las bacterias del humedal que consumen el sustrato; con altas cargas orgánicas se puede tener una menor concentración en el efluente tratado, si la aireación, composición de sustrato u otro factor, no se convierten en limitantes. (Lara y Mazzoco, 2009).

La carga orgánica para humedales de flujo vertical recomendable es alrededor de un valor entre 0 a 40 g DBO<sub>5</sub> / m<sup>2</sup> d. (Arias y Brix, 2005). Las tasas de cargas excesivas pueden causar la acumulación de materia orgánica, la reducción del espacio vacío y presentaría bajas eficiencias de remoción de contaminantes (Vymazal y Kropfelová, 2009).

**4.6.4 Obstrucción del humedal por carga hidráulica y carga orgánica.** El principal problema que se presenta en el funcionamiento de los humedales de flujo vertical, al aumentar la carga hidráulica y carga orgánica, es la obstrucción del medio filtrante (clogging) y se ve influenciada principalmente por las tasas de cargas de  $\text{DBO}_5$ , DQO y los sólidos en suspensión (Winter y Goetz, 2003), (Ilustración 4); así mismo, trae como consecuencia diferentes efectos adversos en cadena; como encharcamientos en la superficie del medio, aparición de olores y de plagas, disminución del caudal en el efluente y crea una mayor contaminación en el humedal (Turon et al, 2009).

Ilustración 4. Descripción del proceso de obstrucción del medio en humedales flujo vertical.



( Hua et al., 2010).

Donde **A** representa la fase de eliminación de contaminantes, **B** donde se observa el encharcamiento del medio de soporte y **C** la compactación del medio como consecuencia del aumento de la carga hidráulica y orgánica.

**4.6.5 Material vegetal.** Numerosos estudios sobre eficiencia de humedales contruidos han concluido que el desempeño de ellos es más eficiente cuando se encuentran plantados (Kadlec y Wallace, 2009). La porción inmersa de las plantas forma una superficie en la cual se encuentra un abundante diversidad microbiana, de manera que la asociación entre las raíces de las plantas y los microorganismos presentes funciona como un filtro que elimina y transforma la materia orgánica disuelta en el agua y algunos componentes minerales entre ellos el nitrógeno. Estos componentes son asimilados como nutrientes por la plantas (Ramírez, 2002).

La cantidad de oxígeno aportado por la planta depende de muchos factores entre los que se encuentran la especie, el tamaño, la edad de la planta, las condiciones ambientales, las condiciones oxidativas de las raíces y por último, la toma de carbono y nutrientes que los incorporan a los tejidos de la planta (Vymazal y Kropfelová, 2009).

Algunas plantas tienen también la capacidad de acumular metales u otras sustancias como una respuesta de adaptación a la contaminación, como son las

plantas híper-acumuladoras que pueden vivir en ambientes con altas concentraciones de nutrientes, sales o agentes tóxicos y son ampliamente utilizadas en procesos de fitorremediación (Weisner, 2004). La fitorremediación se define como el uso de las plantas para eliminar, destruir o transformar contaminantes en el suelo, agua y aire (Zhi-xin, 2007).

**4.6.5.1 *Heliconia psittacorum*.** Colombia es considerada el país más diverso en Heliconias con 94 especies que equivalen aproximadamente al 50% del total de las especies (Peña-Salamanca y Madera, 2013). Recientes investigaciones han evidenciado una tendencia en la utilización de plantas ornamentales en los sistemas de humedales construidos, las cuales, además de los beneficios ambientales asociados al tratamiento de las aguas residuales, han encontrado efectos positivos en la bioremediación (Ascúntar y Toro, 2007). Por tal motivo, la *Heliconia psittacorum* al ser una planta nativa de nuestra región y debido a cierta tolerancia a un amplio espectro de condiciones ambientales generando alta eficiencia de eliminación de nutrientes, además brinda beneficios económicos adicionales al ser cosechada su biomasa aérea (Madera y Peña, 2013)

Ilustración 5. *Heliconia Psittacorum*.

HELICONIA	
CLASE	<i>Magnoliophyta</i>
ORDEN	<i>Zingiberales</i>
FAMILIA	<i>Heliconiaceae</i>
GENERO	<i>Heliconia</i>
ESPECIE	<i>Heliconia Psittacorum</i>



(Starr, 2007).

**4.6.6 Medio de soporte de los humedales construidos de flujo vertical.** Los sustratos más utilizados como medio de soporte incluyen principalmente materia natural, medios artificiales y subproductos industriales, tales como: grava, arena, arcilla, calcita, mármol, ceniza, bentonitas piedra caliza, zeolitas y carbón activados (Yan y Xu, 2014; Albuquerque, 2009).

El medio de soporte desempeña un papel crítico en términos de eliminación de contaminantes de las aguas residuales, ya que proporcionan los medios de comunicación entre las comunidades microbianas, la vegetación y los contaminantes para las bioreacciones (Saeeda y Sunc, 2012); determinan por un lado, las condiciones ambientales en el interior de los espacios porosos (aerobio,

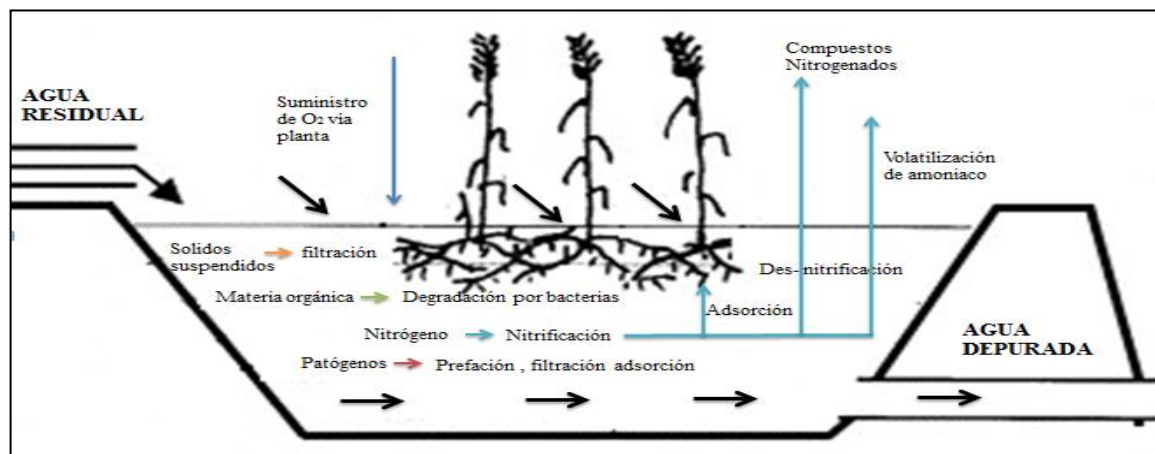


anaerobio y anóxico), para fomentar la eliminación de nitrógeno y compuestos orgánicos en los humedales. Por otro lado, las características del medio de soporte pueden definir en gran medida el comportamiento del humedal de flujo vertical debido a que afectan importantes aspectos del sistema como son la conductividad hidráulica (Wang, 2010) y el pH del agua (Kadlec et al., 2004).

**La arena** (medio filtrante empleado en este estudio) se caracteriza por presentar espacios entre los poros más pequeños que aumentan el tiempo de filtración del agua a través del humedal, optimizando el contacto de ésta con la biopelícula, mejorando las reacciones microbianas aerobias (Ávila et al, 2014). De igual forma, la arena se ha empleado por diferentes estudios obteniendo buenos rendimientos en la eliminación de contaminantes y bajos problemas de obstrucción (Torrens et al, 2009; Dan et al, 2011).

**4.6.7 Remoción de contaminantes.** Se pueden ver los diferentes procesos que se presentan en los humedales, como también la depuración del agua residual en la Ilustración 6.

Ilustración 6. Transformación de los diferentes contaminante en el humedal.



(Vymazal. , 2007).

- ✓ **Remoción de sólidos suspendidos.** Son removidos por filtración, sedimentación y floculación, a través de un conjunto de elementos que conforman el medio de soporte y los rizomas (Siachoque, 2009).
- ✓ **Remoción de materia orgánica.** Inicialmente la materia orgánica se retira del agua residual, por medio de procesos físicos tales como: la sedimentación, atrapamiento y adsorción, posteriormente, la materia orgánica particulada se hidroliza y se degrada, esto ocurre por procesos aeróbicos o anaeróbicos según sea el caso (García et al, 2010).



La degradación aeróbica en los humedales de flujo vertical se maximiza en los primeros 5 - 10 cm del medio de soporte (Ragusa et al, 2004), debido al alto contenido de nutrientes y al presentar condiciones insaturadas y una alta transferencia de oxígeno (Tietz et al, 2007), que favorece un entorno oxidado y posibilita llevar a cabo procesos tales como: la eliminación de la materia orgánica ( $\text{DBO}_5$ ) (García et al, 2010).

- ✓ **Remoción de nitrógeno.** En los humedales de flujo subsuperficial vertical, la transformación y eliminación de nitrógeno se lleva a cabo fundamentalmente por cinco rutas principales: la amonificación, la nitrificación, la desnitrificación, la absorción de la planta y la asimilación de la biomasa (Saeeda y Sunc, 2012).

**Mineralización.** Es el proceso donde el Nitrógeno orgánico se convierte biológicamente en amónico (Vymazal, 2007).

**Nitrificación.** Es un proceso que básicamente se lleva en dos pasos, donde amonio  $\text{N-NH}_4^+$  en presencia de oxígeno se convierte primero a nitrito de nitrógeno  $\text{N-NO}_2^-$ , estrictamente por bacterias quimiolitotróficas, Nitrosomonas, Nitrosococcus y Nitrosospora, y luego a nitrógeno nítrico  $\text{N-NO}_3^-$  por bacterias quimiolitotróficas facultativas Nitrospira y Nitrobacter. La nitrificación se ve influenciada por la temperatura, el pH, la fuente de carbono, la población microbiana, las concentraciones de amonio y el oxígeno disuelto (Vymazal, 1995).

**Desnitrificación.** Es el proceso donde el nitrato  $\text{N-NO}_3^-$  se convierte en óxido nitroso  $\text{N-NO}_2^-$ , para después pasar a gas de nitrógeno  $\text{N}_2$  (Vymazal J. , 2007). Esta reacción es irreversible y se produce en la presencia de materia orgánica disponible, bajo condiciones anaeróbicas o anóxicas. Se ve influenciada por concentración de nitrato, temperatura, el pH (Kadlec y Knight, 1995).

- ✓ **Remoción de patógenos.** Las bacterias patógenas, los virus y parásitos son removidos, fundamentalmente por una serie de factores físicos-químicos y biológicos que actúan sobre ellos, como son: la adsorción, la sedimentación, la filtración, la depredación, la temperatura y el pH (García, 2004). El rendimiento de eliminación depende del tiempo de retención, por ello, a mayor retención mayor eliminación de microorganismos patógenos. El grado de eliminación obtenido en humedales verticales oscila entre 1 y 2 unidades logarítmicas / 100 mL aproximadamente para todos los indicadores (Lahora, 2003).

#### 4.7 TASA DE CONSUMO DE OXÍGENO (TCO)

La disponibilidad de oxígeno en humedales de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales domésticas, tienden a ser uno de los principales factores limitantes de la velocidad para la eliminación de compuestos carbonosos ( $\text{DBO}_5$ ) y nitrogenados (oxidación de  $\text{N-NH}_4^+$  a  $\text{N-NO}_3^-$ ) (Nivala et al, 2013).

Por tal motivo, para llevar a cabo la descomposición aeróbica de la  $\text{DBO}_5$ , y del proceso de nitrificación es necesario conocer la tasa de transferencia de oxígeno (TCO) (Kadlec y Wallace, 2009). La tasa de transferencia de oxígeno es el proceso físico impulsado por el flujo de aire convectivo y difusivo (Kantawanichkul a et al, 2009) además, la TCO se enfoca en el uso de estequiometría y los datos de calidad del afluente y el efluente.

#### 4.8 MARCO LEGAL

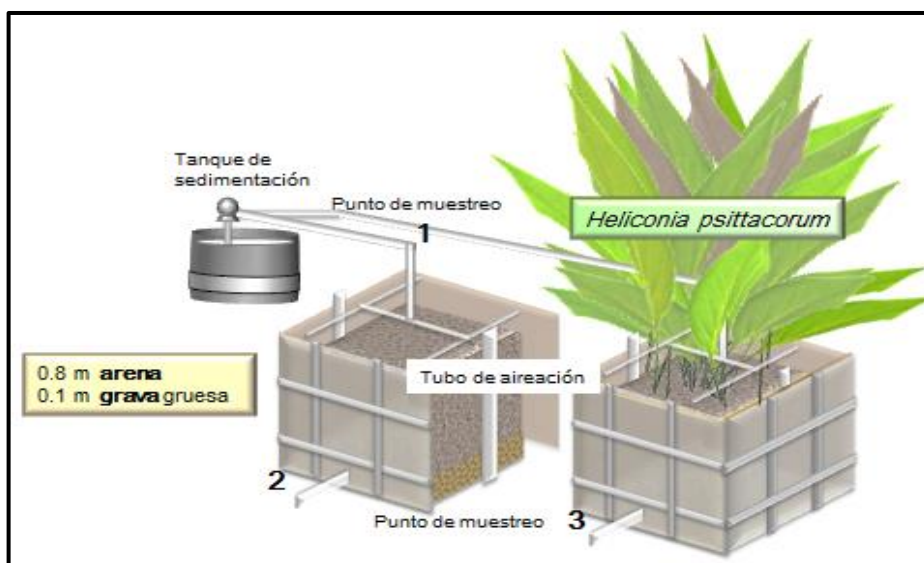
- ✓ **Decreto 3930 de 2010:** Por el cual se reglamenta parcialmente Título I de la Ley 9ª de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II del Decreto-ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones. Actualmente la Guía Nacional de Modelación del Recurso Hídrico, con base en los insumos que aporte el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Es el que regula la capacidad asimilativa de sustancias biodegradables o acumulativas y la capacidad de dilución de sustancias no biodegradables.
- ✓ **DECRETO 1076 del 2015 “DECRETO ÚNICO REGLAMENTARIO DEL SECTOR AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE”** compila en uno solo, todos los decretos reglamentarios vigentes expedidos por el gobierno nacional, que desarrollan las leyes en materia ambiental; el cual no modifica el contenido de los anteriores. Este decreto contiene 3 libros (estructura del sector ambiental, Régimen reglamentario del sector ambiental y, Disposiciones finales).
- ✓ **Resolución 631 de 2015:** por la cual se establecen parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público. Para dicha ilustración en su capítulo V artículo 8 trae los parámetros fisicoquímicos y sus límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de agua residual doméstica – ARD y de las aguas residuales industriales (ARD-ARND) de los prestadores de los servicios públicos de alcantarillado a cuerpos de agua superficiales.

## 5. METODOLOGÍA

### 5.1 UNIDADES EXPERIMENTALES

Se trata de dos humedales de flujo vertical a escala piloto (unidades experimentales), localizados en la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de la Universidad Tecnológica de Pereira Ilustración 7.

Ilustración 7. Esquema de los humedales de tratamiento.



Los dos humedales de flujo vertical contruidos, fueron adaptados con un tanque plástico de 0.95 m x 1.15 m y un área superficial de 1.09 m<sup>2</sup>; tubería tipo pvc presión; Un tubo de aireación de 25.4 mm de diámetro nominal, perforado, en forma de U, el cual fue instalado atravesando el tanque por el fondo y sobresaliendo en la superficie, con el fin de intercambiar oxígeno entre la atmósfera y el sistema. Para el drenaje se utilizó tubería interna de 12.7 mm de diámetro nominal, siendo perforada y recubierta con angeo plástico para evitar taponamientos; asimismo, sobre esta tubería, se ubicó una capa de drenaje de grava gruesa de 0.10 m de espesor, la cual fue cubierta por la capa principal del lecho Arena fina de 0.80 m de espesor y diámetros de  $d_{10} = 0.34$  mm,  $d_{60} = 0.9$  mm,  $d_{10} / d_{60} = 2.64$ .

Para el pretratamiento del agua residual se emplea un tanque de sedimentación para remover los sólidos y posteriormente pasar por un tanque de

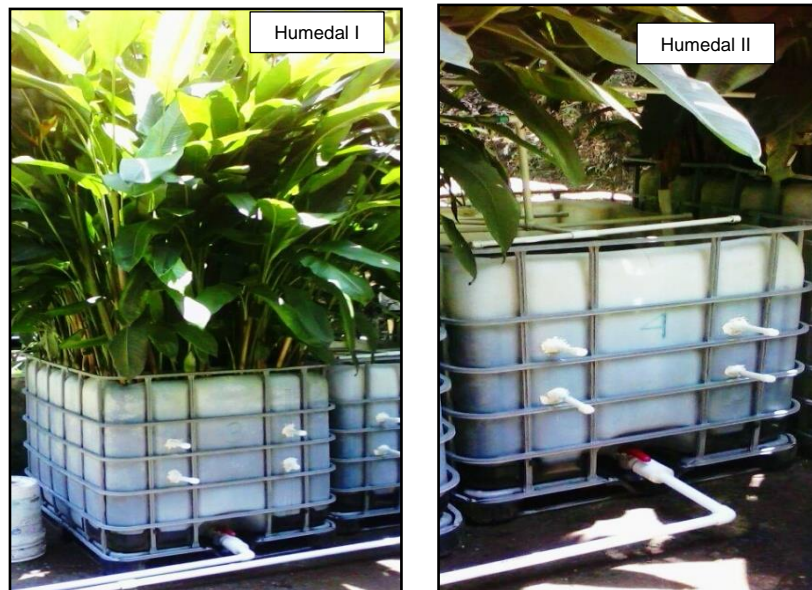
almacenamiento, con ello se evita obstrucciones en el sistema de bombeo y en las tuberías, consiguiendo una distribución óptima del caudal en cada humedal.

Se utilizó una electrobomba de  $\frac{1}{2}$  Hp, de caudal máximo de 35 L / min y 3560 rpm que fue programada por medio de un timer digital con la frecuencia de los pulsos adecuados para el suministro respectivo del caudal de agua residual, a cada uno de los humedales.

La tubería empleada es de  $\frac{1}{2}$  pulgada y presenta una forma de (H), ubicada en la parte superior de cada humedal, la cual se encuentra perforada en la parte inferior para garantizar el riego del caudal, por goteo y en forma homogénea sobre la superficie del humedal.

**El humedal I** se encuentra plantado con *Heliconia psittacorum*, es una planta nativa de nuestra región y debido a cierta tolerancia a un amplio espectro de condiciones ambientales (Peña y Madera, 2013). **El humedal II** consta únicamente del medio filtrante (arena) ilustración 8.

Ilustración 8. Humedales piloto.



Humedal plantado con *Heliconia Psittacorum* **Humedal I** y Humedal sin plantar **Humedal II**.

## 5.2 DISEÑO EXPERIMENTAL

Para este proyecto se monitorearon dos humedales de flujo vertical, como sistema de tratamiento secundario, ambos sistemas contaron con las mismas condiciones de diseño y operación, tanto la unidad plantada (Humedal I, *Heliconia psittacorum*.) como la unidad sin plantar (Humedal II).

Los dos humedales fueron alimentados con agua residual (AR) tomada del afluente de la PTAR; antes de su alimentación, el agua residual debió pasar por un pretratamiento, que consistió en un tanque de sedimentación y su posterior almacenamiento, con ello se evita obstrucciones en el sistema de bombeo y en las tuberías, consiguiendo una distribución óptima del caudal en cada humedal.

A estas dos unidades se evaluaron dos factores: la carga hidráulica – carga orgánica y, la presencia o ausencia de *Heliconia Psittacorum*, mediante ocho tratamientos. Cada tratamiento consto de seis semanas donde en las dos primeras semanas se realizó acondicionamiento de los humedales, y las otras cuatro semanas restantes se realizó el proceso de muestreo (Tabla 2).

**NOTA:** Las denominaciones que se emplean en las ilustraciones y tablas para señalar los tratamientos llevados a cabo en este estudio son:

- ✓ Para humedal plantado es : H plantado
- ✓ Para humedal sin plantar es : H sin Plantar
- ✓ Para carga hidráulica es : C.H
- ✓ Para carga orgánica es : C.O

Tabla 2. Descripción de los tratamientos.

Tratamiento	Semanas	Carga Hidráulica (m / d)	Carga Orgánica (DBO <sub>5</sub> g / m <sup>2</sup> d)	Acondicionamiento(semanas)	Muestreo (semanas)
H plantado 1	1-6	0.15	22	2	4
H sin plantar 2					
H plantado 3	7-12	0.38	59.3	2	4
H sin plantar 4					
H plantado 5	13-18	0.61	128	2	4
H sin plantar 6					
H plantado 7	19-24	0.84	258	2	4
H sin plantar 8					

**5.2.1 La carga hidráulica.** La carga hidráulica empleada para el estudio, se determinó desde la mínima (0.15 m/d) aumentando gradualmente hasta la máxima (0,84 m / d).

- ✓ **La carga hidráulica mínima.** Se basó según los cálculos de diseño de construcción de los humedales de flujo vertical que realizó Bohórquez (2015) donde el criterio para definir el caudal fue la carga orgánica superficial, que debe estar entre 250 y 500 kg / ha d (Shilton y Mara, 2005). De esta manera, el primer valor de concentración de DBO<sub>5</sub> obtenido para el afluente de los humedales fue de 180 mg / L, siendo la referencia para calcular la carga orgánica superficial (COS) y reemplazar su valor en la siguiente ecuación 1.

Ecuación 1. Calculo del caudal basado en la carga orgánica superficial.

$$Q_{diseño} = \frac{Area \times COS}{[DBO_5]_{mínimo}} = \frac{1.09m^2 \times 0.025 Kg m^{-2}d^{-1}}{0.18 Kg m^{-3}} = 0.15 m^3 d^{-1}$$

(Shilton y Mara, 2005) (Bohórquez, 2015)

La tasa de carga hidráulica es la expresión matemática de velocidad que relaciona el caudal de entrada con el área de un sistema de tratamiento, ecuación 2.

Ecuación 2. Carga hidráulica

$$\frac{Q (m^3/d)}{A (m^2)}$$

Donde las unidades de carga hidráulica se expresan en m / d, como se hace referencia en la Tabla 2.

- ✓ **La carga hidráulica máxima.** Fue de 0.84 m / d basándose en los parámetros estipulados por Torrens (2009), en un rango de 0.75 – 0.80 m / d.
- ✓ **La alimentación de la carga hidráulica.** Se realiza de forma intermitente (pulsos), ya que puede mejorar: 1- la eliminación de la materia orgánica y la eliminación de nitrógeno (Haberl, 1995); 2- impulsar la difusión del oxígeno

atmosférico en el interior de los medios de soporte y 3- minimiza el riesgo de obstrucción del medio (Paing et al, 2015) (Tabla 3).

Tabla 3. Carga hidráulica suministrada a los humedales de flujo vertical y el número de pulsos

Carga Hidráulica (m/d)	Caudal ( $L/d$ )	Numero de Pulsos ( $pulsos/d$ )
0.15	163.5	4
0.38	414.2	9
0.61	664.9	15
0.84	915.6	20

**5.2.2 La carga orgánica.** La carga orgánica que se empleó en el estudio (Sección 5.2). Se expresó en términos de  $DBO_5$  g / m<sup>2</sup> d, que representa la materia orgánica disuelta para cada carga hidráulica aplicada.

**5.2.3 La presencia o ausencia e *Heliconia Psittacorum*.** El humedal I fue plantado con *Heliconia Psittacorum* para evaluar el efecto de ésta en la remoción de contaminantes presentes en el agua residual doméstica.

**5.2.4 Toma de muestreo.** Cada tratamiento consto de 4 semanas de análisis (sección 5.2), donde una vez a la semana se analizaron los parámetros  $DBO_5$ , DQO, SST,  $N-NH_4^+$ ,  $N-NO_3^-$ ,  $N-NO_2^-$  T, pH, conductividad, coliformes fecales y *E. coli*; a su vez, cada parámetro se analizó por duplicado, tanto en el H. plantado como en el H. sin plantar (Tabla 4).

Tabla 4. Toma de muestra.

TRATAMIENTO		
Parámetros	Semana de muestreo	Replica por parámetro
<b>C.H 0.15 m / d C.O 22 g / m<sup>2</sup> d</b>		
DBO <sub>5</sub> , DQO, SST, $N-NH_4^+$ , $N-NO_3^-$ , $N-NO_2^-$ T, pH, conductividad, coliformes fecales y <i>E. coli</i> .	1	2
	2	2
	3	2
	4	2
<b>C.H 0.38 m / d C.O 59.3 g / m<sup>2</sup> d</b>		
DBO <sub>5</sub> , DQO, SST, $N-NH_4^+$ , $N-NO_3^-$ , $N-NO_2^-$ T, pH, conductividad, coliformes fecales y <i>E. coli</i> .	1	2
	2	2
	3	2
	4	2
<b>C.H 0.61 m / d C.O 129 g / m<sup>2</sup> d</b>		
DBO <sub>5</sub> , DQO, SST $N-NH_4^+$ , $N-NO_3^-$ , $N-NO_2^-$ T, pH, conductividad, coliformes fecales y <i>E. coli</i> .	1	2
	2	2
	3	2

TRATAMIENTO		
Parámetros	Semana de muestreo	Replica por parámetro
	4	2
C.H 0.84 m / d C.O 258 g / m <sup>2</sup> d		
DBO <sub>5</sub> , DQO, SST, N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> T, pH, conductividad, coliformes fecales y <i>E. coli</i> .	1	2
	2	2
	3	2
	4	2

Total de muestras por cada parámetro ocho (8) en cada uno de los tratamiento.

### 5.3 OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LAS UNIDADES

Se realizaron las siguientes operaciones para garantizar el buen funcionamiento de los humedales.

**5.3.1 Limpieza de los humedales.** A los tanques se le realizó un adecuado mantenimiento, lavándolos constantemente para evitar malos olores o proliferación de plagas; a las tuberías se les efectuó inspecciones frecuentes, ya que son susceptibles a obstrucciones o taponamientos, tanto en su interior como en los orificios de la distribución de agua residual; a la planta *Heliconia psittacorum* se observó constantemente para que no presentara estados de senescencia, ni presencia de plantas invasoras. El lavado se realiza de forma mecánica y con agua a presión.

**5.3.2 Control en el suministro del caudal.** La electrobomba se debe inspeccionar constantemente y realizar el cebado, para así evitar cualquier daño en el sistema mecánico y tenerla en óptimo funcionamiento. El cebado se realiza llenando con agua la tubería que comunica el tanque de almacenamiento con la electrobomba antes de comenzar su absorción del agua residual del tanque de almacenamiento.

La distribución del caudal sobre el medio filtrante es de vital importancia, pero a su vez el diseño estructural del suministro del caudal debe cubrir la totalidad de la superficie del humedal; en este caso su fabricación fue en forma de H y suministrando el caudal mediante pulsos, cumpliendo así los estándares requeridos para este estudio. De esta manera evitar la colmatación sobre la superficie del humedal, la aparición de olores y de plagas, además la disminución del caudal en el efluente (sección 5.1).

Cuando se presenta la colmatación varios autores han sugerido diferentes mecanismos de restauración del medio como la excavación, lavado y la reutilización del medio, la aplicación directa de sustancias químicas, como el peróxido de hidrógeno H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, cloruro de sodio NaCl en concentraciones de 5%,



15% o 18 % (Hua et al, 2010; Nivala et al, 2012), y la aplicación de lombrices de tierra (Schütz et al, 2008); ya que tienen la capacidad de contribuir a la aireación y drenaje de los suelos.

**5.3.3 Recolección de muestra.** El muestreo se realiza dependiendo de los procedimientos analíticos que se lleven a cabo, (cuerpo de agua, efluente, agua residual, entre otros.), donde se analizaran las variables fisicoquímicas de interés. La muestra deber ser preservada, ya sea por medio de aditivos químicos o por refrigeración, para así conservar las características del material original (IDEAM, 2007) Tabla 5.

Las técnicas de recolección y preservación de las muestras son de gran importancia, debido a la necesidad de verificar la precisión, exactitud y representatividad de los datos que resulten de los análisis.

Tabla 5. Requerimientos y almacenamiento de muestras de agua

Parámetro	Conservación	Máximo Almacenamiento Recomendado
Ph	Analizar inmediatamente	0.25 h
Conductividad eléctrica	Refrigeración	28 d
Temperatura	Analizar inmediatamente	0.25 h
DQO 7d/28d	Analizar tan pronto sea posible, o adicionar $H_2SO_4$ a pH < 2.0, refrigerar	7 d / 28 d
DBO <sub>5</sub>	Refrigeración 4°C	6 h / 48 h
Nitrato Nitrito	Adicionar $H_2SO_4$ a pH < 2.0, refrigerar	2 d / 28 d
Amonio	Analizar tan pronto como sea posible o adicionar $H_2SO_4$ a pH < 2.0, refrigerar	7 d / 28 d
Sólidos	Refrigeración 4°C	2 d / 7 d

(IDEAM TI0187 , 2007).

## 5.4 PARÁMETROS ANALIZADOS

Los parámetros se analizaron tanto del afluente como del efluente de los humedales construidos H sin plantar y H plantado. Estos análisis se realizaron con una frecuencia semanal, en el laboratorio de Química Ambiental de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Tecnológica de Pereira.

Los parámetros DBO<sub>5</sub>, DQO, SST, N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, T, pH y conductividad se analizaron aplicando las diferentes técnicas estipuladas en el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater edición 22 (APHA, 2012) y se muestran en las Tabla 6 y Tabla 7.

Tabla 6. Método de análisis de parámetros fisicoquímicos.

PARÁMETRO	MÉTODO ANALÍTICO	EQUIPO EMPLEADO
Temperatura	Multi parámetro	Mettler Toledo SevenGoDuo pro
pH.	pH-metro	OHAUS STARTER 3100
Conductividad eléctrica	Multi parámetro	Mettler Toledo SevenGoDuo pro

(APHA, 2012).

Tabla 7. Método de análisis parámetros.

PARÁMETRO	MÉTODO ANALÍTICO
Sólidos Totales	Gravimétrico (mg / L)
DBO <sub>5</sub>	Respirométrico
DQO	Reflujo cerrado (mg / L)
N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Espectrofotométrico emisión ultravioleta ( mg / L)

(APHA, 2012).

Los parámetros de nitrógeno como el nitrito N-NO<sub>2</sub><sup>-</sup> y nitrógeno amoniacal N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> fueron analizados por los siguientes métodos:

- ✓ **Parámetro Nitrito N-NO<sub>2</sub><sup>-</sup>.** Se llevó a cabo por el método fotométrico mediante el uso de set de reactivos 114776 nitrite test Merck millipore (Merck Millipore, 114776 | Test Nitritos).
- ✓ **Parámetro nitrógeno amoniacal N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>.** Se llevó a cabo por el método fotométrico mediante el uso del set de reactivos 114752 ammonium-test merck millipore (Millipore, 114752 | Test Amonio).

## 5.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para cada parámetro, se determinaron:

- ✓ **La eficiencia de remoción** en términos de porcentaje, teniendo en cuenta las cargas contaminantes en afluente y efluente.

El cálculo se realizó de acuerdo a la siguiente ecuación 3.

Ecuación 3. Eficiencia de remoción.

$$\% \text{ – eficiencia de remoción} = 1 - \left( \frac{Q_{\text{efluente}} \times C_{\text{Efluente}}}{Q_{\text{Afluente}} \times C_{\text{Afluente}}} \right) \times 100$$

Donde

$Q_{\text{afluente}}$  y  $Q_{\text{Efluente}}$  se expresan en (L / d) (L / d), son los caudales de entrada y salida del humedal.

$C_{\text{Afluente}}$  y  $C_{\text{Efluente}}$  se expresan en (mg / L), son las concentraciones del contaminante a la entrada y a la salida del humedal

- ✓ **Carga contaminante removida (CCR).** Los parámetros de DQO, DBO<sub>5</sub>, SST, N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> y NT fue calculada como la diferencia entre la carga contaminante en el afluente ( $CC_{\text{Afluente}}$ ) y la carga contaminante del efluente ( $CC_{\text{Efluente}}$ ) de acuerdo a la siguiente ecuación

Ecuación 4. Carga contaminante removida.

$$CCR = \frac{CC_{\text{Afluente}} - CC_{\text{efluente}}}{A}$$

Donde

$$\begin{aligned} CC_{\text{Afluente}} &= Q_{\text{Afluente}} \times C_{\text{Afluente}} \\ CC_{\text{efluente}} &= Q_{\text{efluente}} \times C_{\text{efluente}} \end{aligned}$$

Donde

CCR se expresa en (g / m<sup>2</sup> d).

$Q_{\text{afluente}}$  y  $Q_{\text{Efluente}}$  en (L / d), es el caudal de entrada y salida del humedal respectivamente.

$C_{\text{Afluente}}$  y  $C_{\text{Efluente}}$  en (g / L), es la concentración del contaminante a la entrada y salida del humedal respectivamente.

A es el área del humedal en (m<sup>2</sup>).

- ✓ **Los resultados de DQO y SST.** Fueron analizados cumpliendo los parámetros establecidos en la **Resolución 0631 de 2015** en su artículo 8º, donde contiene los parámetros fisicoquímicos y sus límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de agua residual doméstica –ARD en las que se refieren a aguas residuales domesticas de las soluciones individuales de saneamiento de viviendas unifamiliares o bifamiliares (Tabla8). Debido a que los humedales de flujo vertical son una alternativa viable para el tratamiento de aguas residuales domesticas en hogares individuales, grupos de viviendas, comunidades aisladas e industrias (CDWT, 2009). tambien se analizó **el parámetro de DBO<sub>5</sub>** con respeto a la **Resolución 0631 2015**, pero para vertimientos del alcantarillado a cuerpos de aguas superficiales, ya que para éste parámetro no existe referencia en vertimientos provenientes de viviendas unifamiliares y bifamiliares; siendo el límite máximo permisible de concentración de 90 mgO<sub>2</sub>/ L en términos de la DBO<sub>5</sub>.

Tabla 8. Límites Máximos Permisibles en los Vertimientos Puntuales.

Parámetros	Unidades	Aguas residuales domesticas ARD De las soluciones individuales de saneamiento de viviendas unifamiliares o bifamiliares
pH.	Unidades de pH	6 – 9
demanda química de oxígeno (DQO)	mg / L O <sub>2</sub>	200
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO <sub>5</sub> )	mg / L O <sub>2</sub>	-
Solidos suspendidos totales (SST)	mg / L	100
<b>COMPUESTOS DE NITRÓGENO</b>		
Nitratos N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg / L	-
Nitritos N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	mg / L	-
Nitrógeno amoniacal N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	mg / L	-
Nitrógeno total	mg / L	-

Resolución 631 de 2015, Art. 8.

Además los Coliformes totales y la *E-Coli*, se cuantificaron por medio de unidades logarítmicas removidas como indicadores de remoción de patógenos.

## 5.6 TASA DE CONSUMO DE OXÍGENO (TCO)

Para el presente estudio se calculó la TCO para el H plantado y el H sin plantar, en cada tratamiento, se determinó la tasa de consumo de oxígeno, por medio de los parámetros de DBO<sub>5</sub> y N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> mediante la ecuación propuesta por (Cooper, 2005), como se muestra en la ecuacion 5.

Ecuación 5. Tasa de consumo de oxígeno

$$TCO = \frac{[\Delta M_{DBO_5} + \Delta M_{N-NH_4^+}]}{A}$$

Donde

TCO = Se expresa g / m<sup>2</sup> d.

ΔM = La masa eliminada a un parámetro específico g / d.

A= El área en m<sup>2</sup>.

$$\Delta M = Q_i(c_i - c_o)$$

Donde

Q<sub>i</sub> = Caudal en la entrada m<sup>3</sup> / d.

C<sub>i</sub> = Concentración a la entrada mg / L.

C<sub>o</sub> = Concentración a la salida mg / L.

## 5.7 LA CONSTANTE DE VELOCIDAD DE ELIMINACIÓN (K)

La ecuación de constante velocidad que se empleó fue de primer orden (Kadlec & Knight, 1996), como se muestra en la ecuación 6.

Ecuación 6. Constante de velocidad.

$$K = C.H (\ln C_{entrada} - \ln C_{salida})$$

Donde

K = La constante de velocidad de eliminación de primer orden, en (m / año).

C.H = La carga hidráulica empleada en el periodo de seguimiento expresada en (m / año).

C<sub>entrada</sub> y C<sub>salida</sub> = Son las concentración a la entrada y salida de cada contaminante (mg / L) respectivamente.

## 5.8 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Para llevar a cabo el análisis estadístico del presente estudio fue necesario analizar los humedales en cuatro momentos (C.H 0.15 m / d C.O 22 g / m<sup>2</sup> d), (C.H 0.38 m / d C.O 59.3 g / m<sup>2</sup> d), (C.H 0.61 m / d C.O 129 g / m<sup>2</sup> d), (C.H 0.84 m / d C.O 258 g / m<sup>2</sup> d), evaluando los diferentes parámetros tales como: DBO<sub>5</sub>, DQO, SST, N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, N-NO<sub>2</sub><sup>-</sup>T, pH y conductividad. Para tal efecto fue necesario utilizar un análisis estadístico descriptivo en el programa Microsoft Excel 2010, donde se trabajó los diferentes parámetros mencionados anteriormente; luego a dichos parámetros se les determino las medias y las desviaciones estándares en cada uno de los tratamientos aplicados en el estudio. Además, se determinaron los valores mínimos y máximos para cada uno de los parámetros.

## 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.1 CARACTERÍSTICAS DEL AGUA RESIDUAL

Los humedales construidos de flujo subsuperficial vertical se alimentaron con agua residual tomada de la PTAR de la Universidad Tecnológica de Pereira, después del proceso de sedimentación. En la Tabla 9 se muestran las características del agua residual doméstica a tratar con las diferentes cargas hidráulicas y orgánicas empleadas en el proyecto de investigación.

El valor promedio de la relación de biodegradabilidad ( $DBO_5/DQO$ ) para el agua residual doméstica a tratar fue de 0.65; éste valor se encuentra dentro del intervalo de 0.3 – 0.8 (Metcalf y Eddy, 2003) para aguas residuales sin tratamiento; además, el valor de la relación al ser superior a 0.5 indica que el agua es fácilmente degradable por microorganismos (Saeeda y Sunc, 2012).

El valor promedio que se encontró en la concentración de nitrógeno amoniacal en el afluente de los dos humedales fue entre 113 y 127 mg  $N-NH_4^+$  / L. Según Kadlec y Wallace (2009) plantean que la concentración de nitrógeno amoniacal presente en el agua residual doméstica oscila entre 20 y 60 mg  $N-NH_4^+$  / L. Por lo tanto el valor de la concentración de nitrógeno amoniacal en el estudio es casi dos veces más concentrado que lo reportado para un agua residual típica, es así que después de la materia orgánica, el componente más importante es nitrógeno total, debido a los diferentes problemas medioambientales que genera, cuando es depositado directamente sobre un cuerpo de agua, como es la eutrofización de ríos y lagos, que afecta los niveles de oxígeno disponible y ocasiona la muerte de los organismos acuáticos.

Tabla 9. Características del agua residual doméstica a tratar.

PARÁMETROS	n	Características del Agua Residual Doméstica			
		Valor Mínimo	Valor Máximo	Valor Promedio	Desviación Estándar
Temperatura °C	15	21	22.5	21.7	0.50
pH	15	7.60	8.60	8.09	0.32
Conductividad $\mu\text{S} / \text{cm}$	15	112	174	1411	181
<b>Materia Orgánica</b>					
DQO $\text{mg O}_2 / \text{mL}$	15	136	600	332	121
DBO <sub>5</sub> $\text{mg O}_2 / \text{mL}$	13	102	341	202	67.6
SST $\text{mg} / \text{L}$	15	12	130	66	33
<b>Compuesto de Nitrógeno</b>					
N-Amoniacal $\text{mg N-NH}_4^+ / \text{L}$	15	91	153	126	14.2
N-Nitrito $\text{mg N-NO}_2^- / \text{L}$	15	0.05	0.23	0.12	0.05
N-Nitrato $\text{mg N-NO}_3^- / \text{L}$	15	1.95	16	6.89	3.71

## 6.2 ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS

En los diferentes análisis presentados en las ilustraciones y tablas, el efluente del humedal sin plantar no aparece en el último tratamiento, debido a que este humedal soportó una carga máxima de CH 0.61 m / d y C.O 129 g / m<sup>2</sup> d y superior a estos se colmató.

**6.2.1 pH.** Los valores de pH en el afluente, para las diferentes cargas hidráulicas, se encontraron entre 7.75 y 8.35 unidades de pH. Los valores de pH en los efluentes de los dos humedales mostraron una tendencia a mantenerse en un rango ligeramente ácido (Ilustración 10). Es posible que este resultado se deba a las interacciones entre el medio filtrante y la biopelícula en los procesos de remoción de contaminantes (materia orgánica y N. amoniacal).

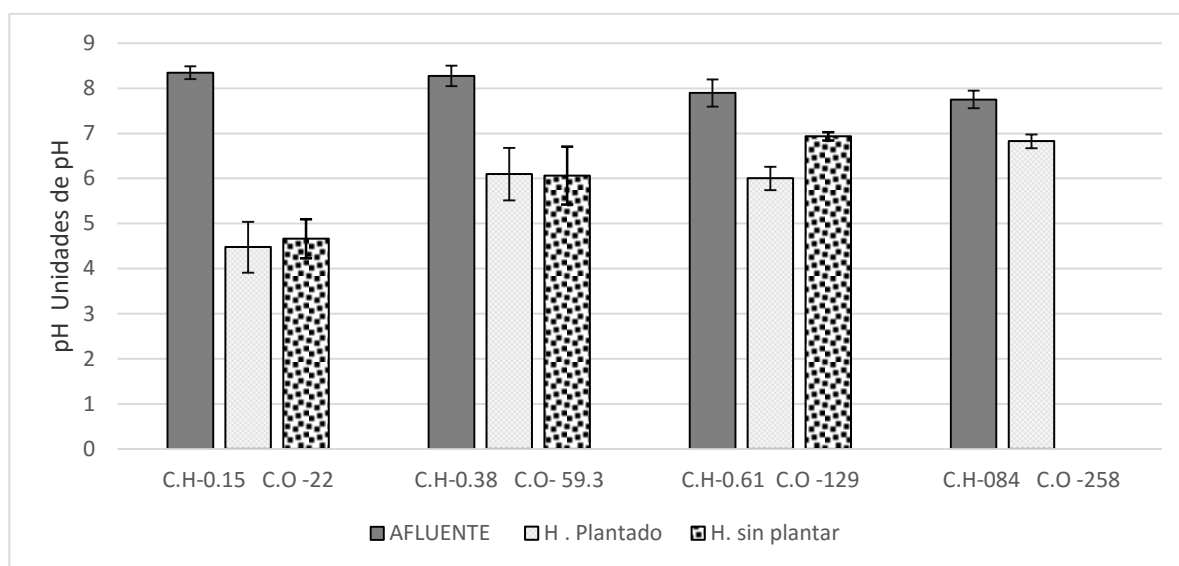
Sin embargo, a medida que se aumentó la carga orgánica el pH de los efluentes también aumentó progresivamente, tanto en humedal plantado con el humedal sin plantar; es probable que esto ocurra por la acumulación de materia y sólidos suspendidos en los primeros centímetros del medio filtrante, lo que imposibilita mantener las condiciones redox de los humedales, logrando así el aumento en el pH de los efluentes (Nivala et al, 2012). De igual manera es posible que el aumento del pH se deba a los diferentes procesos de remoción de nitrógeno que



se llevaron a cabo en los dos humedales. Esta información se ampliará en la sección 6.3.5.

En el presente estudio se evidencio que el valor del pH fue de 7.75 - 8.35, este promedio se encuentra dentro del rango investigado en otros estudios, como lo mostrado por Saeeda y Sunc ( 2012) donde el pH óptimo es 6.5 – 8.5, para llevar a cabo el proceso de amonificación. Paredes (2007) encontró que en un pH 7- 8 se presenta la formación de bacterias nitrificantes, y Vymazal (2007) en su estudio evidencia que a un pH 6 - 8 se presenta el proceso de desnitrificación.

Ilustración 9. Comportamiento del pH en los diferentes tratamientos



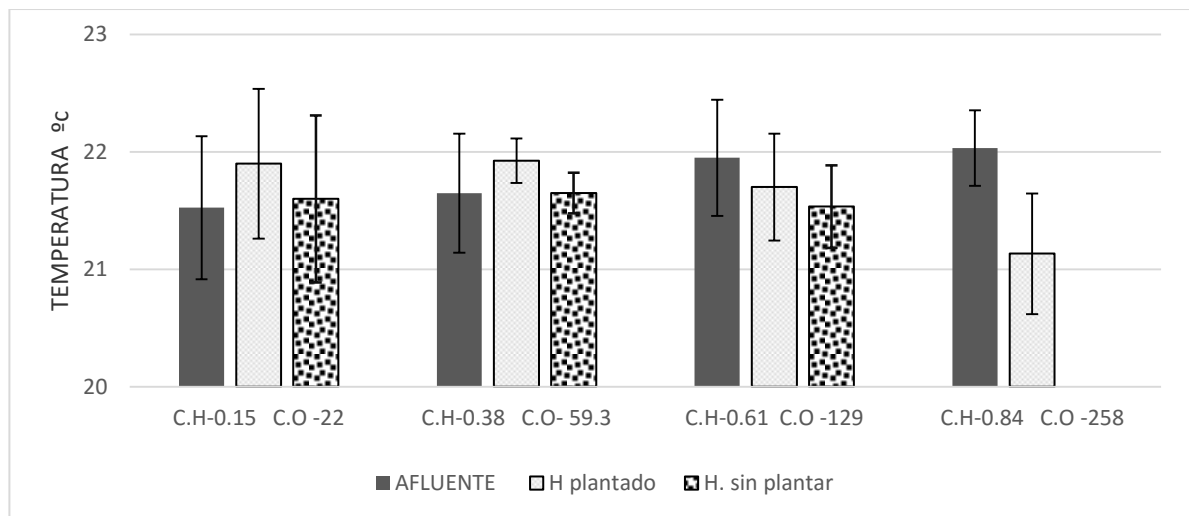
C.H Carga hidráulica ( $m/d$ ) y C.O Carga orgánica ( $g/m^2d$ )

**6.2.2 Temperatura.** La temperatura del afluente estuvo entre 21.5 a 22°C, este valor es óptimo para llevar a cabo los procesos de amonificación, nitrificación y degradación de materia orgánica. Como se muestra en el estudio de (Katayon y Fiona, 2008), donde el rangos de temperatura es de 16.5 – 32 °C para llevar a cabo estos procesos. En otro estudio Truu et al, (2009) indicaron que las condiciones tropicales pueden mejorar la eliminación de contaminantes, ya que los microorganismos suelen alcanzar su actividad óptima a temperaturas cálidas (15-25 °C).

En los efluentes se observó una disminución en la temperatura, a una carga orgánica 129 g / m<sup>2</sup> d para el H sin plantar y a una carga orgánica de 258 g / m<sup>2</sup> d para el H plantado (Ilustración 11); la disminución de la temperatura pudo ocasionarse, debido al aumento de las cargas orgánicas en los humedales, los cuales llegaron al punto de colmatación. De igual forma las reacciones

microbiológicas aerobias como son la degradación, la nitrificación y la desnitrificación posiblemente no se den a la misma velocidad que un proceso en óptimas condiciones; ocasionando así la disminución en la temperatura de los efluentes en ambos humedales (Vymazal, 2007).

Ilustración 10. Comportamiento de la temperatura en los diferentes tratamientos



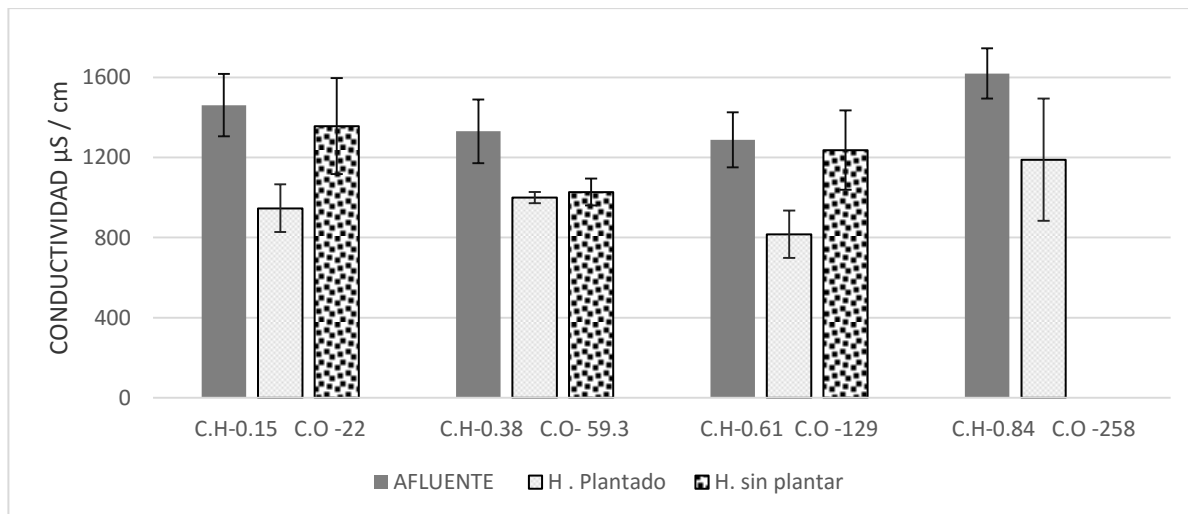
C.H Carga hidráulica ( $m/d$ ) y C.O Carga orgánica ( $g/m^2d$ )

**6.2.3 Conductividad Eléctrica.** La conductividad eléctrica para el afluente en los diferentes tratamientos aumenta a medida que lo hace la carga hidráulica y orgánica pasando de 1461 – 1619  $\mu S/cm$ .

En cuanto a los efluentes de los humedales, plantado y sin plantar, presentaron valores de conductividad por debajo con respecto al afluente, como resultado de la remoción de las sales disueltas ( $NH_4^+$ ,  $NO_3^-$ ).

Asimismo, el efluente del humedal plantado presenta conductividades inferiores con respecto al humedal sin plantar (Ilustración 12), debido a la presencia de arial vegetal (*Heliconia psittacorum*), que favorece una serie de efectos físicos, como la filtración, mayor tasa de sedimentación (Pettecrew y Kalff, 1992); además, aumenta el tiempo de contacto entre el agua residual y microorganismos que ayudan a la eliminación de las sales disueltas (Brix, 1997).

Ilustración 11. Comportamiento de la conductividad en los diferentes tratamientos



C.H Carga hidráulica ( $m/d$ ) y C.O Carga orgánica ( $g/m^2d$ ).

## 6.3 REMOCIÓN DE CONTAMINANTES

**6.3.1 Remoción de materia orgánica.** Los dos humedales de flujo subsuperficial vertical, fueron evaluados en cuanto a la eficiencia de remoción de materia orgánica bajo condiciones de clima tropical, uno plantado con *Heliconia psittacorum* y el otro sin plantar; de acuerdo a la capacidad de reducción de cargas contaminantes (parámetros de DQO y DBO<sub>5</sub>), con base en la carga hidráulica y carga orgánica aplicadas, para determinar así cuál es el tratamiento más efectivo.

**6.3.1.1 Remoción de DQO.** Al verificar el máximo de capacidad en los dos humedales de flujo vertical, se obtuvo una carga hidráulica y una carga orgánica con resultados óptimos tanto en el humedal plantado con *Heliconia psittacorum* de C.H 0.84 m / d y C.O 258 g / m<sup>2</sup> d, como para el humedal sin plantar C.H 0.61 m/d y C.O 129 g / m<sup>2</sup> d. Al llegar a estas cargas se obtuvieron efluentes con concentraciones de 161 mg / L para el humedal plantado y de 125 mg / L para el humedal sin plantar (Tabla 10), las cuales estuvieron dentro del valor máximo permisible (200 mg / L), según lo establecido por la normativa Colombiana en la Resolución 0631 de 2015.

Sin embargo, se observó un aumento en las concentraciones de DQO en los efluentes, cuando la carga orgánica aplicada pasó de 129 g / m<sup>2</sup> d a 258 g / m<sup>2</sup> d para el humedal plantado con *Heliconia psittacorum*, y de 59.3 g / m<sup>2</sup> d a 129 g / m<sup>2</sup> d para el humedal sin plantar (Tabla10). Estas concentraciones pudieron

deberse al aumento de materia orgánica y sedimentos en la superficie del humedal pasando de un ambiente insaturado a uno saturado, por ende, la materia que no se pudo descomponer se añadió a las concentraciones de los efluentes lo que afectó de manera negativa la eficiencia de remoción de DQO.

En cuanto a la eficiencia de remoción en carga de DQO, ésta estuvo en un rango del 63% al 87% para el humedal plantado, y para el humedal sin plantar se obtuvo un porcentaje de 79% a 83% como se muestra en la sección 6.3.1.3.

Los resultados anteriores son similares a los obtenidos por Paing et al (2015) que mostró un rendimiento de remoción del 80% DQO para cargas hidráulicas menores a 0.6 m / d. En el estudio de Stefanakis y Tsihrintzis (2012) se muestra un trabajo con diez (10) humedales de flujo vertical con cargas hidráulicas de 0.19 m / d, 0.26 m / d y 0.43 m / d con carga orgánica de 89 g / m<sup>2</sup> d, 105 g / m<sup>2</sup> d y 180 g / m<sup>2</sup> d, obteniendo un 75% en la eficiencia de remoción de DQO, donde la carga orgánica máxima fue de 200 g DQO / m<sup>2</sup> d, obteniendo una eliminación de carga contaminante entre 140 a 195 g DQO / m<sup>2</sup> d.

Tabla 10. Cargas de DQO y concentraciones del afluente y efluente en las diferentes cargas hidráulicas y orgánicas aplicadas.

DQO	afluente		H plantado			H sin plantar		
	g/m <sup>2</sup> d	mg/L	Carga removida	efluente		Carga removida	efluente	
			g/m <sup>2</sup> d	g/m <sup>2</sup> d	mg/L	g/m <sup>2</sup> d	g/m <sup>2</sup> d	mg/L
C.H 0.15 m / d - C.O 22 g / m <sup>2</sup> d								
Media	27.2	168	23.9	3.28	26	22.7	4.45	31.4
Desviación estándar	5.03	34.3	5.82	1.52	11.4	5.11	1.38	10.05
C.H 0.38 m / d - C.O 59.3 g / m <sup>2</sup> d								
Media	117	316	94.2	23.4	71	94.8	22.2	59.2
Desviación estándar	8.47	22.2	8.83	3.6	10.9	6.64	4.21	22.5
C.H 0.61 m / d - C.O 129 g / m <sup>2</sup> d								
Media	242	446	195	47.2	93.2	180	59.7	125
Desviación estándar	28.8	106	23.8	12.7	24.7	10.5	29.1	61.5
C.H 0.84 m / d - C.O 258 g / m <sup>2</sup> d								
Media	349	408	214	134	161			
Desviación estándar	21.7	28.8	23.9	6.59	12.2			

Res. 0631 de 2015					200mg/L			200mg/L
----------------------	--	--	--	--	---------	--	--	---------

**6.3.1.2 Remoción de DBO<sub>5</sub>.** En términos de DBO<sub>5</sub>, en los dos humedales se aplicaron cargas progresivas, con el fin de verificar el máximo de capacidad para ser óptimo en la remoción de DBO<sub>5</sub>, dando como resultado en el humedal sin plantar una carga óptima de C.H de 0.38 m / d y C.O de 59 g DBO<sub>5</sub> / m<sup>2</sup> d en el afluente, con una remoción de carga DBO<sub>5</sub> de 46 g /m<sup>2</sup> d y concentración en el efluente de 42.2 mg/L. Así mismo, el humedal plantado obtuvo una carga óptima de C.H 0.61 m / d y C.O de 129 g DBO<sub>5</sub> / m<sup>2</sup> d en el afluente, con una remoción de carga de DBO<sub>5</sub> 94 g /m<sup>2</sup> d y una concentración en el efluente de 60.5 mg/L (Tabla11), las cuales estuvieron dentro del valor máximo permisible (90 mg / L), según lo establecido por la normativa Colombiana en la Resolución 0631 de 2015.

También se presentó, que al cambiar de una C.H de 0.38 m / d a 0.61 m / d aumento la concentración en el efluente hasta 149 mg / L para el humedal sin plantar, y para el humedal plantado al pasar de una C.H de 0.61 m / d a 0.84 m / d aumentó la concentración en el efluente hasta 117 mg / L, generando de esta manera una reducción en la eficiencia del tratamiento de la materia orgánica y efluentes con altas concentraciones (Tabla 11).

Referente a la eficiencia de remoción de la DBO<sub>5</sub> se vio altamente influenciada por el aumento de las cargas hidráulicas en ambos humedales, donde se presentó mayor eficiencia a bajas cargas aplicadas. Por lo tanto, el porcentaje en la eficiencia de remoción en la carga óptima (C.H 0.61 m / d y C.O de 129 g DBO<sub>5</sub> / m<sup>2</sup> d) en el humedal plantado fue de 73 %, y en el humedal sin plantar el porcentaje en la eficiencia de remoción en la carga optima (C.H 0.38 m / d y C.O de 59 g DBO<sub>5</sub> / m<sup>2</sup> d) fue de 79 %; como se muestra en la en la sección 6.3.1.3.

Esta disminución en el porcentaje de eficiencia de remoción pudo ser causada por la elevada frecuencia de alimentación entre los lotes al aumentar la carga hidráulica, lo que induce la acumulación de materia contaminante en la superficie del medio filtrante (Tanner y Sukias, 1995 a), generando una disminución en la tasa de infiltración y de la cantidad de oxígeno disponible para degradar materia orgánica y por lo tanto un aumento en la concentración de esta en los efluentes (Calheiros et al, 2007).

Los resultados anteriores, en lo que se refiere a los afluentes son similares con las empleadas por diferentes autores, Torrens et al (2009) que aplicaron cargas entre 17-170 g DBO<sub>5</sub> / m<sup>2</sup> d. Brix y Arias (2005) entre 10 y 40 g DBO<sub>5</sub> / m<sup>2</sup>. Paing et al, (2015) y Prochaska et al, (2007) entre 50-40 g DBO<sub>5</sub> / m<sup>2</sup>. Stefanakis y Tsihrintzis, (2012) entre 89 – 180 g / m<sup>2</sup> d. Molle et al, (2006) entre 250g DBO<sub>5</sub> / m<sup>2</sup> d.

En cuanto a las eficiencias de remoción son cercanas a las reportadas por Stefanakis y Tsihrintzis, (2012), Dan et al (2011) entre 79% - 72% y por Paing et al (2015) del 87%.

Tabla 11. Cargas DBO<sub>5</sub> y concentraciones del afluente y efluente en las diferentes cargas hidráulicas y orgánicas aplicadas.

DBO <sub>5</sub>	afluente		H plantado			H sin plantar		
	g/m <sup>2</sup> d	mg/L	Carga removida	efluente		Carga removida	efluente	
			g/m <sup>2</sup> d	g/m <sup>2</sup> d	mg/L	g/m <sup>2</sup> d	g/m <sup>2</sup> d	mg/L
C.H 0.15 m/d - C.O 22 g / m <sup>2</sup> d								
Media	21.9	136	19.6	2.36	18	18.6	3	21.5
Desviación estándar	4.74	31.7	4.38	0.75	5.92	3.21	1.71	11.4
C.H 0.38 m / d - C.O 59.3 g / m <sup>2</sup> d								
Media	59.3	159	41.6	17.6	50.5	46.4	12.9	42.2
Desviación estándar	10.9	29.5	7.40	6.06	14.5	6.35	6.83	24.1
C.H 0.61 m/d - C.O 129 g / m <sup>2</sup> d								
Media	129*	210	94.8	34.4	60.5	57.8	71.7	149
Desviación estándar	6	8	7.58	6.65	11.1	5.55	4.46	9.81
C.H 0.84 m /d - C.O 258 g/ m <sup>2</sup> d								
Media	258*	302	160	98.06	117			
Desviación estándar	28.7	33.5	34.5	28.5	33.3			
Res. 0631 de 2015					90mg/L			90mg/L

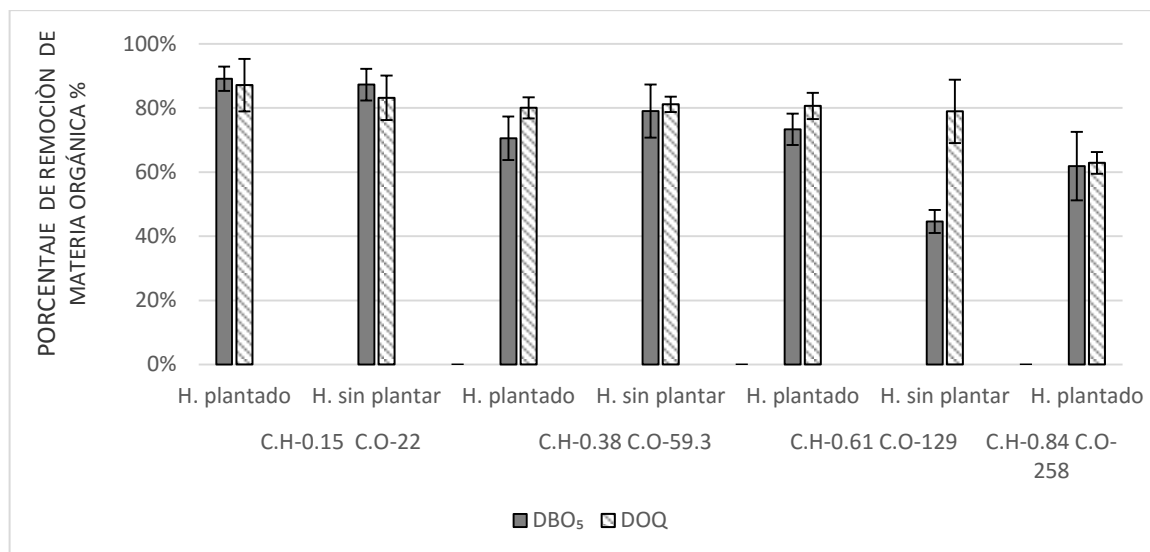
\*.Sobrecarga en el humedal sin plantar y \* Sobrecarga en el humedal plantado

**6.3.1.3 Influencia de la *Heliconia psittacorum* en la remoción de materia orgánica.** Durante los primeros tratamientos, no se observaron mayores hallazgos entre el humedal plantado con *Heliconia psittacorum* y el humedal sin plantar para la remoción de materia orgánica.

Sin embargo, a partir de la C.H de 0.61 m / d y C.O de 129 g DBO<sub>5</sub> / m<sup>2</sup> d, el humedal sin plantar se colmató causando disminución en la infiltración del caudal y aumento en la concentración de materia orgánica en el efluente; mientras que el humedal plantado con la *Heliconia psittacorum* continuo presentando alta eficiencia de remoción y efluente con concentraciones bajas de materia orgánica, probablemente por el crecimiento de los nuevos brotes (Molle et al, 2006). Además, las raíces de la *Heliconia psittacorum* proporcionan un ambiente aerobio

que acelera la degradación de la materia orgánica como se evidencia en la Ilustración 12.

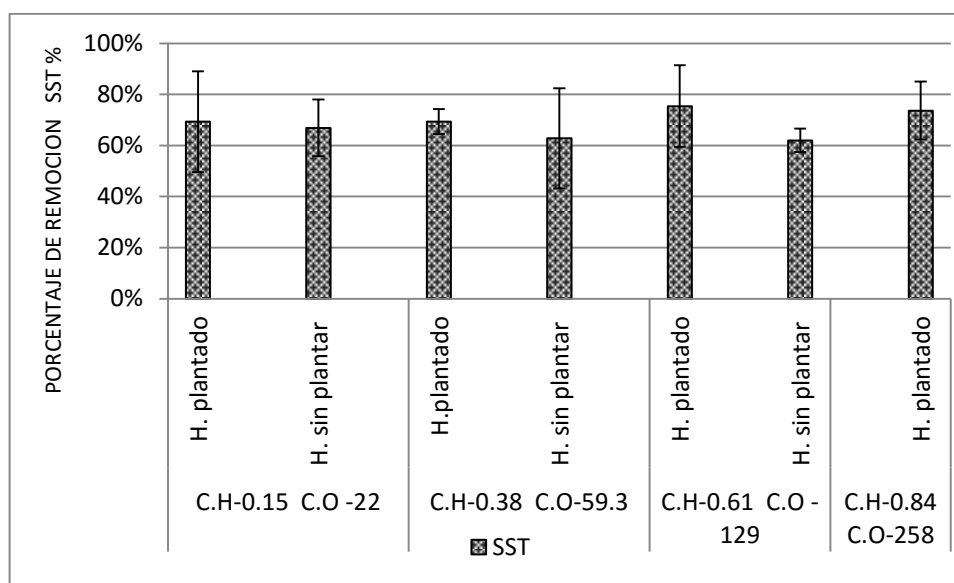
Ilustración 12. Porcentaje de remoción de la materia orgánica a las diferentes cargas hidráulicas y orgánicas aplicadas.



C.H. Carga hidráulica ( $m/d$ ) y C.O. Carga orgánica ( $g/m^2 d$ ).

**6.3.2 Remoción de sólidos suspendidos totales (SST).** La remoción en carga de SST, fue mayor a C.H de 0.61 m / d y C.O de 129 g / m<sup>2</sup> d para el humedal sin plantar y para el humedal plantado con *Heliconia psittacorum* a C.H de 0.84 m / d y C.O 258 g / m<sup>2</sup> d; estas cargas mencionadas anteriormente son las óptimas en cuanto a la remoción SST en los dos humedales del estudio. Obteniendo así efluentes con carga en solidos alrededor de 20.4 g / m<sup>2</sup> d en el humedal sin plantar y de 21.4 g / m<sup>2</sup> d en el humedal plantado con *Heliconia psittacorum* (Tabla 12). Por lo tanto, se observó que la eliminación de solidos suspendidos totales, presento un porcentaje alto para el humedal plantado entre 65% - 77%, y para el humedal sin plantar entre 55% - 67% durante todo el proceso del estudio (Ilustración 13). Resultados similares fueron reportados en el estudio realizado por Torrens et al (2009), con una reducción del 59% en sólidos en suspensión.

Ilustración 13. Porcentaje de remoción de SST para las diferentes cargas hidráulicas y orgánicas aplicadas.



C.H .Carga hidráulica ( $m/d$ ) y C.O Carga orgánica ( $g/m^2d$ ).

Además, las concentraciones en los efluentes estuvieron alrededor de 20 mg / L, para el humedal plantado y de 40 mg / L para el humedal sin plantar; estos valores están dentro del rango límite máximo de concentración de 100 mg / L de acuerdo con la resolución 0631-2015 de la normativa Colombia.

Tabla 12. Cargas de SST y concentraciones del afluente y efluente en las diferentes cargas hidráulicas y orgánicas aplicadas.

SST	afluente		H plantado			H sin plantar		
	g/m²d	mg/L	Carga removida	efluente		Carga removida	efluente	
			g/m²d	g/m²d	mg/L	g/m²d	g/m²d	mg/L
C.H 0.15 m / d - C.O 22 g / m² d								
Media	9.43	53.9	7.32	2.11	15.50	7.01	2.42	17.9
Desviación estándar	2,57	31.8	3.45	0.99	8.96	2.67	0.30	4.90
C.H 0.38 m / d - C.O 59.3 g / m² d								
Media	16.8	41.2	11.8	5	14.5	10.5	6.35	19
Desviación estándar	5.16	17.4	5.55	1.21	3.50	5.37	2.27	7.86
C.H 0.61 m / d - C.O 129 g / m² d								
Media	55.5	78.2	45.8	9.72	20.9	35.1	20.5	42.8



SST	afluente		H plantado			H sin plantar		
	g/m <sup>2</sup> d	mg/L	Carga removida	efluente		Carga removida	efluente	
			g/m <sup>2</sup> d	g/m <sup>2</sup> d	mg/L	g/m <sup>2</sup> d	g/m <sup>2</sup> d	mg/L
Desviación estándar	18.7	30.1	17.9	4.92	3.21	19.4	4.44	9.40
<b>C.H 0.84 m / d - C.O 258 g / m<sup>2</sup> d</b>								
Media	83.6	97.8	62.2	21.4	25.6			
Desviación estándar	17.6	20.8	17.8	7.92	9.18			
<b>Res. 0631 de 2015</b>					100mg/L			100mg/L

En la Tabla 12 se observa mayor carga removida en el humedal plantado. Esto se debe en cierta forma al crecimiento de las raíces de la *Heliconia psittacorum*, que pudo mejorar la porosidad del medio, y por ende su conductividad hidráulica y mayor filtración del agua residual (Karathanasis et al, 2003; Molle et al., 2006), generando de esta forma mayor reducción de las partículas en suspensión, por atrapamiento en el interior de los poros del medio filtrante. Posiblemente el medio plantado frente a un medio sin plantar mejoró los diferentes mecanismos fisicoquímicos, como son las fuerzas de adsorción, coagulación, sedimentación, flotabilidad, el intercambio iónico/fuerzas de van der Waals, fuerzas electrostáticas, entre otras (Hua et al,2010).

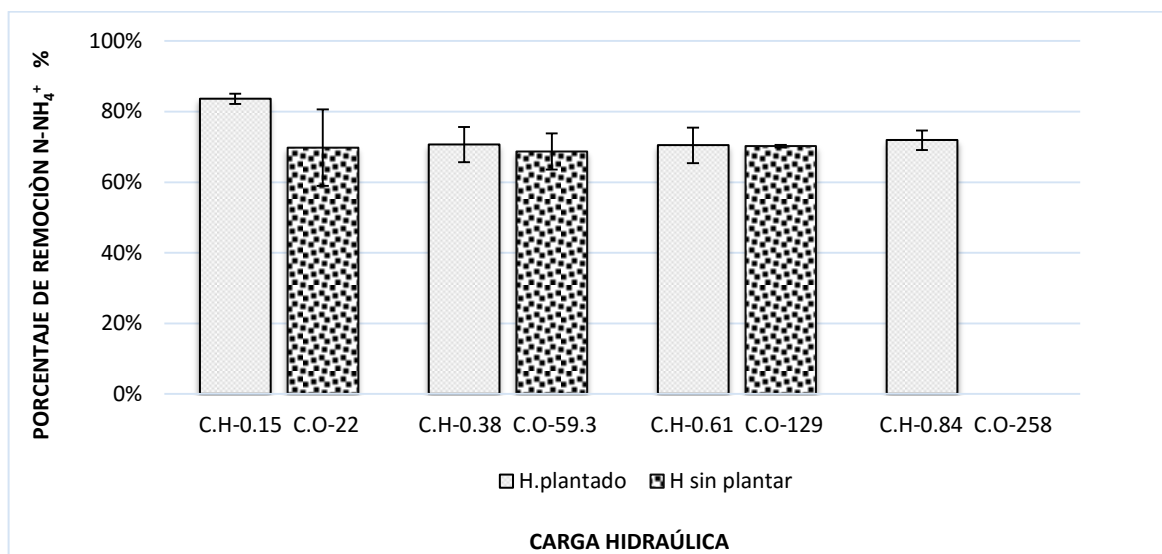
Resultados similares fueron mostrados por (Karathanasis et al, 2003), este estudio reflejo mayor remoción de sólidos en suspensión en los humedales plantados, en comparación con los humedales sin plantar. Concluyeron que las raíces de las plantas pueden contribuir a la filtración en los humedales de flujo subsuperficial.

**6.3.3 Remoción de nitrógeno como amonio.** La remoción de nitrógeno amoniacal fue mayor a la C.H de 0.61 m / d y C.O de 129 g / m<sup>2</sup> d para el humedal sin plantar, y para el humedal plantado con *Heliconia psittacorum* a la C.H de 0.84 m / d y C.O 258 g / m<sup>2</sup> d, estas cargas mencionadas anteriormente son las óptimas en cuanto a la remoción N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> en los dos humedales del estudio. Obteniendo así una remoción en carga de N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 55.8 g/ m<sup>2</sup> d para el humedal sin plantar y para el humedal plantado con una carga removida de 82.9 g/ m<sup>2</sup> d como se muestra en la Tabla 13.

La eficiencia de remoción de N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> se mantuvo alrededor de 70% al aumentar progresivamente la carga hidráulica y orgánica. En particular, para el humedal plantado, la eficiencia de remoción decreció conforme se aumentó a la segunda carga hidráulica y carga orgánica (C.H de 0.38 m / d y C.O de – 59 g / m<sup>2</sup> d). Ver (Ilustración 14).

Los porcentajes de remoción fueron similares a los reportados por Torrens et al (2009)  $\geq 59\%$   $\text{NH}_3\text{-N}$  y cercanas a las obtenidas por Dan et al (2011) con una eficiencia de remoción del 88%.

Ilustración 14. Porcentaje de remoción de  $\text{N-NH}_4^+$  para los diferentes cargas hidráulicas y orgánicas aplicadas.



C.H Carga hidráulica ( $\text{m}/\text{d}$ ) y C.O Carga orgánica ( $\text{g}/\text{m}^2\text{d}$ ).

En cuanto a la concentración de  $\text{N-NH}_4^+$  en los efluentes (Tabla 13), fueron similares entre tratamientos. Es decir que la concentración de  $\text{N-NH}_4^+$  en el efluente se mostró indiferente ante el aumento tanto de la carga hidráulica como de la carga orgánica, incluso a la presencia de plantas. Las remociones de carga contaminante de  $\text{N-NH}_4^+$  aumentaron ante el incremento de las cargas hidráulicas y orgánicas.

Tabla 13. Cargas de  $\text{N-NH}_4^+$  y concentraciones del afluente y efluente para las diferentes cargas hidráulicas y orgánicas aplicadas.

N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Afluente		H plantado			H sin plantar		
	g/m <sup>2</sup> d	mg/L	Carga removida	Efluente		Carga removida	Efluente	
			g/m <sup>2</sup> d	g/m <sup>2</sup> d	mg/L	g/m <sup>2</sup> d	g/m <sup>2</sup> d	mg/L
C.H. 0.15 m / d - C.O 22 g / m <sup>2</sup> d								
Media	18.1	120	14.9	3.26	30.6	12.7	5.42	46.6
Desviación estándar	1,94	14	1	1.42	10.7	2.08	1.83	14.3

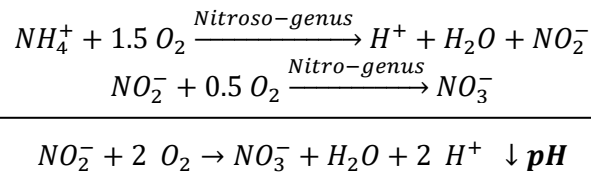
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Afluente		H plantado			H sin plantar		
	g/m <sup>2</sup> d	mg/L	Carga removida	Efluente		Carga removida	Efluente	
			g/m <sup>2</sup> d	g/m <sup>2</sup> d	mg/L	g/m <sup>2</sup> d	g/m2d	mg/L
C.H 0.38 m / d - C.O 59.3 g / m <sup>2</sup> d								
Media	49.5	124	35.1	14.4	45.01	34.1	15.3	47.8
Desviación estándar	4.38	20.7	8.39	0.99	5.14	7.22	1.37	5.01
C.H 0.61 m / d - C.O 129 g / m <sup>2</sup> d								
Media	79.4	129	56.1	23.3	43.4	55.8	23.6	48.2
Desviación estándar	7.35	6.07	3.41	3.30	5.74	2.23	2.37	5
C.H 0.84 m / d - C.O 258 g / m <sup>2</sup> d								
Media	115	135	82.9	32.3	38.8		-	-
Desviación estándar	8.03	9.39	8.11	2.40	3.18		-	-

**6.3.4 Formación de nitratos.** Las concentraciones de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> se incrementaron en el efluente con respecto al afluente para todos los tratamientos, lo cual sumado a la transformación de amonio, indica la ocurrencia de procesos de nitrificación, los cuales se favorecen, en general, por la presencia de materia orgánica, altas tasas de oxígeno disponible esperadas en humedales verticales y pH óptimo en el afluente entre 6.5 - 8.5.

Específicamente, durante la aplicación de las menores cargas hidráulicas y orgánicas (C.H de 0.15 m / d y C.O de 22 g / m<sup>2</sup> d), el aumento de la concentración de nitratos (N - NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) en el efluente con respecto al afluente fue más pronunciado con respecto a las demás cargas aplicadas; en este caso las concentraciones de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> pasaron de 11 mg / L a 63 mg / L y 75 mg / L en el humedal plantado y sin plantar, respectivamente (Ilustración 15). Este es un resultado esperado, debido a que la aplicación de menores cargas hidráulicas beneficia las condiciones óptimas para la ocurrencia de los procesos de nitrificación.

A sí mismo, algunas de las condiciones que favorecieron los procesos de nitrificación inhibieron en cierta medida el proceso de desnitrificación, además de generar efluentes con pH ácidos (H<sup>+</sup>). La reacción general para el proceso de nitrificación se muestra en la Reacción 1.

Reacción 1. Global de la nitrificación.

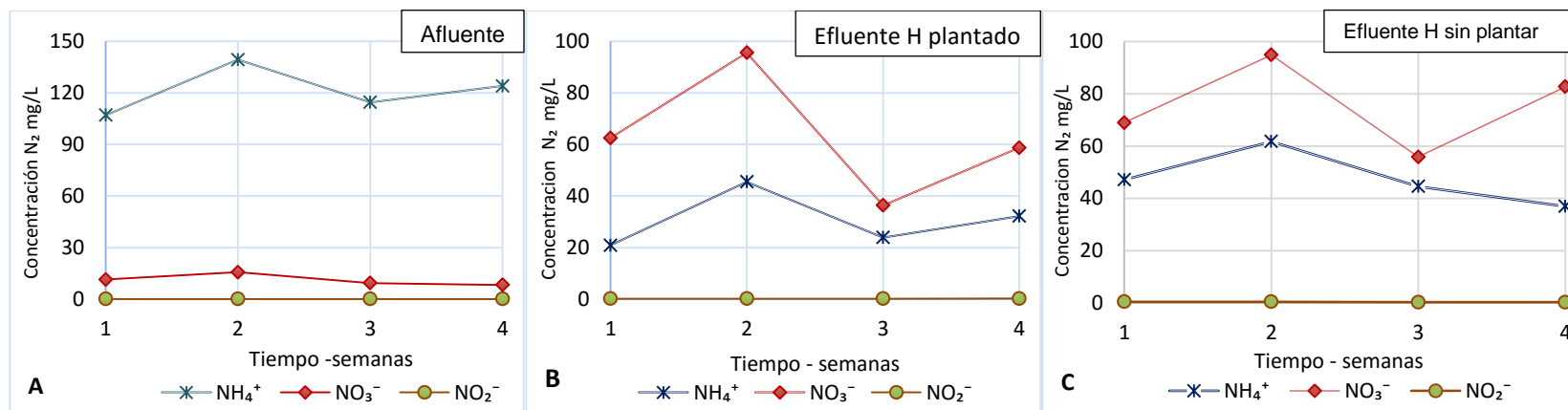


(Reddy y Patrick, 1984).

Por otra parte, a mayor carga hidráulica que corresponde a 0.38 m / d (Ilustración 16), se da un proceso de nitrificación menos activo; observando efluentes con concentraciones bajas en N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, esto se debe en primer lugar, a que al ir aumentando la carga hidráulica, también lo hace la frecuencia de los pulsos de alimentación, reduciendo el tiempo de oxigenación y la oxidación del amonio. En segundo lugar, posiblemente el proceso de nitrificación se vio afectado por el aumento en la concentración de la DBO<sub>5</sub> hasta 159 mg DBO<sub>5</sub> / L en el afluente; dando como resultado efluentes con bajas concentraciones de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (20 mg N - NO<sub>3</sub><sup>-</sup> / L), con respecto a la observada en la carga hidráulica anterior (65 mg N - NO<sub>3</sub><sup>-</sup> / L) (Ilustración 15). Teniendo en cuenta el aumento en la concentración de la materia orgánica, Lansing y Martin (2006) sugirieron que la concentración de DBO<sub>5</sub> no debe superar los 200 mg / L para no inhibir el proceso de nitrificación en los humedales.

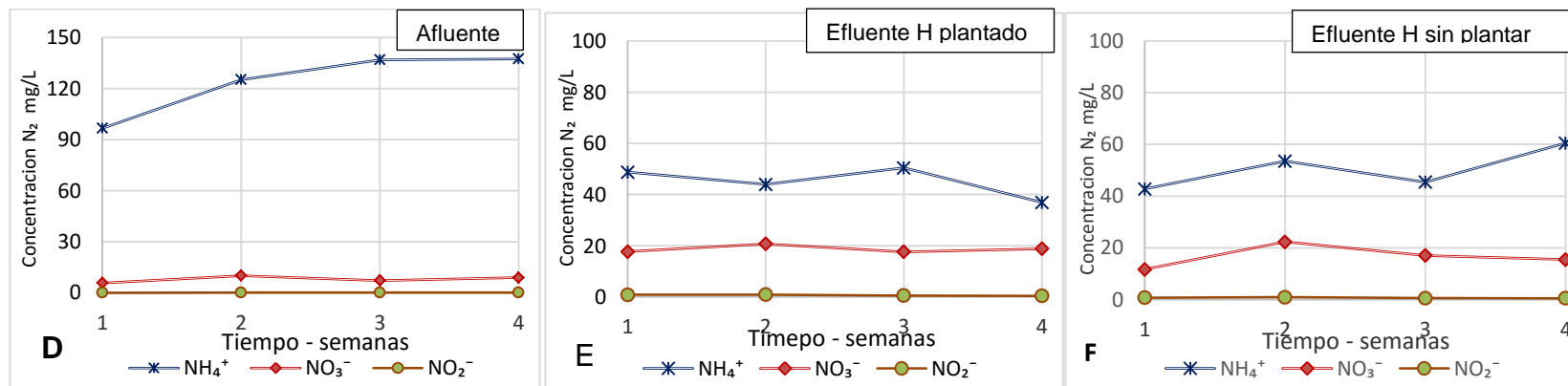
Igualmente, cuando se observó la colmatación en la superficie de los humedales se presentó una notable disminución en los nitratos en el efluente como se muestra en la Ilustración 17 e Ilustración 18.

Ilustración 15. Comportamiento del nitrógeno a una C.H de 0.15 m / d y una C.O de 22 g / m<sup>2</sup>d (concentración 136 mg DBO<sub>5</sub> / L).



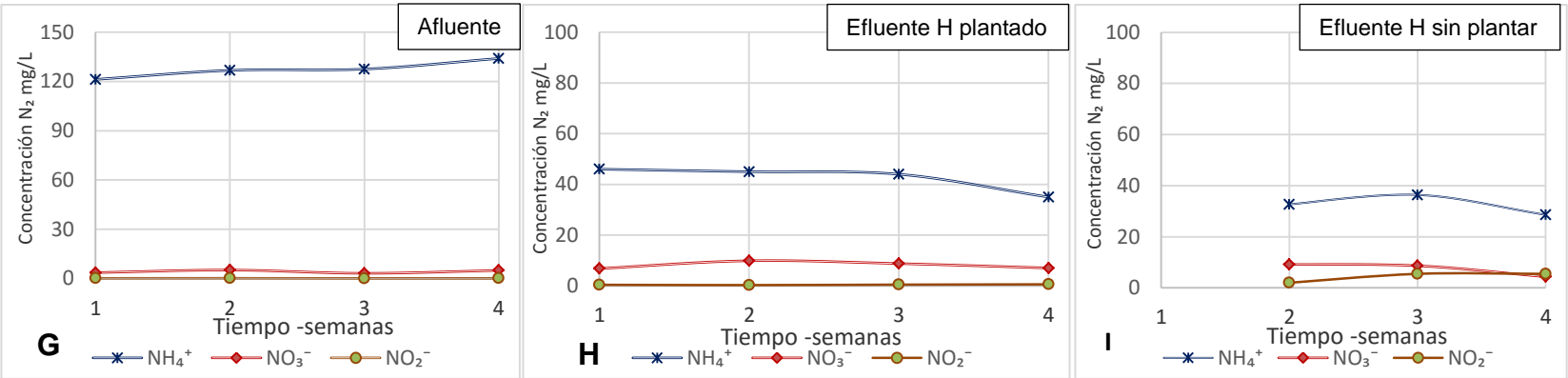
Siendo **A** las concentraciones mg/L de las especies de nitrógeno en el **AFLUENTE**, **B** las concentraciones mg/L de las especies de nitrógeno en el **EFLUENTE** del H plantado y **C** las concentraciones mg/L de las especies de nitrógeno en el **EFLUENTE** del H sin plantar.

Ilustración 16. Comportamiento del nitrógeno a una C.H de 0.38 m / d y una C.O de 59 g / m<sup>2</sup>d (concentración 159 mg DBO<sub>5</sub> / L).



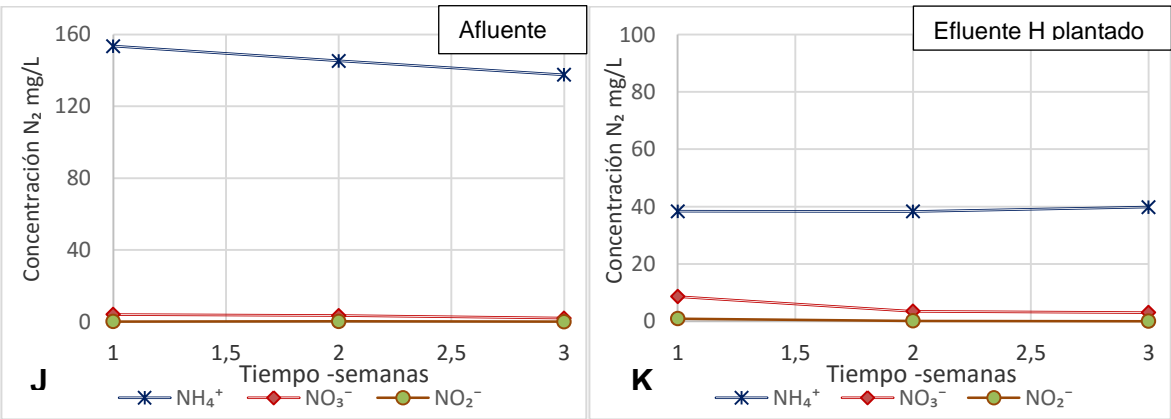
Siendo **D** las concentraciones mg/L de las especies de nitrógeno en el **AFLUENTE**, **E** las concentraciones mg/L de las especies de nitrógeno en el **EFLUENTE** del H plantado y **F** las concentraciones mg/L de las especies de nitrógeno en el **EFLUENTE** del H sin plantar.

Ilustración 17. Comportamiento del nitrógeno a una C.H de 0.61 m / d y una C.O de 129 g / m<sup>2</sup>d (concentración 210 mg DBO<sub>5</sub> / L).



Siendo, **G** las concentraciones mg/L de las especies de nitrógeno en el **AFLUENTE**, **H** las concentraciones mg/L de las especies de nitrógeno en el **EFLUENTE** del H plantado y **I** las concentraciones mg/L de las especies de nitrógeno en el **EFLUENTE** del H sin plantar.

Ilustración 18. Comportamiento del nitrógeno a una C.H de 0.84 m / d y una C.O de 258 g / m<sup>2</sup>d (concentración 302 mg DBO<sub>5</sub> / L).

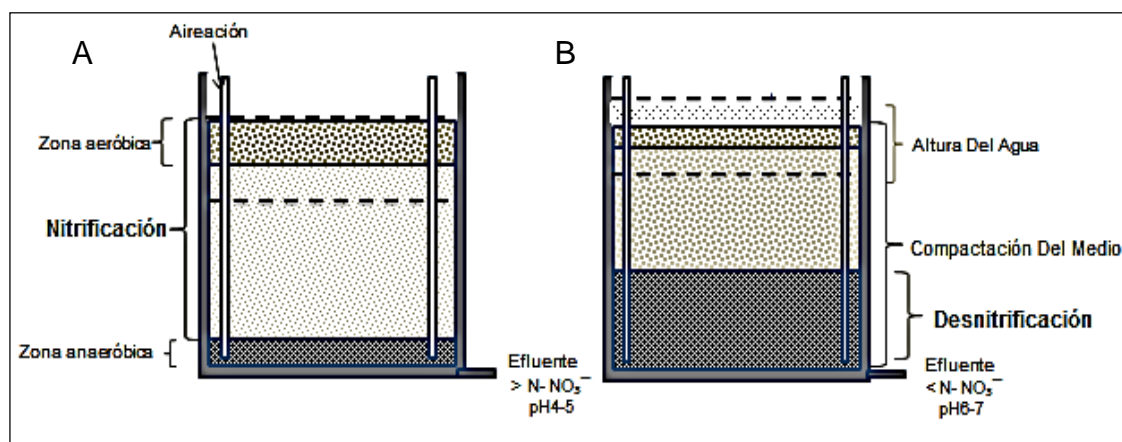


Siendo **J** las concentraciones mg/L de las especies de nitrógeno en el **AFLUENTE**, **K** las concentraciones mg/L de las especies de nitrógeno en el **EFLUENTE** del H plantado.

**6.3.5 Proceso de desnitrificación.** El proceso de desnitrificación se observó marcadamente cuando el medio filtrante estaba totalmente saturado a las cargas de C.H 0.61m / d y C.O 129 g / m<sup>2</sup> d para el humedal sin plantar (Ilustración 17), y para el humedal plantado a las cargas de C.H 0.84 m / d y C.O 258 g / m<sup>2</sup> d (Ilustración18). Éste proceso probablemente se debió al aumento de las cargas hidráulicas y orgánicas aplicadas en los dos humedales del estudio, lo cual produjo el paso de un ambiente insaturado a un ambiente saturado, generando zonas anaerobias, anoxica, mayor presencia de materia orgánica en la superficie del medio y una reducción sustancial de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en los efluentes de los humedales (Ilustración 19).

De acuerdo al resultado anterior, se reflejan semejanzas en el estudio realizado por Kim et al, (2015) donde en la fase parcialmente saturada del medio filtrante se observó una disminución de las concentraciones de nitrato en el efluente, mientras que las concentraciones de amonio en el efluente se mantuvieron estables.

Ilustración 19. Esquema de nitrificación y desnitrificación.

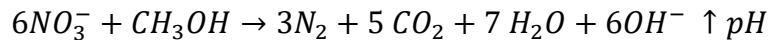


El humedal **A** bajo opera bajo cargas hidráulicas y orgánicas óptimas y el humedal **B** Cuando el humedal está bajo sobrecarga.

También se observó que el proceso de desnitrificación en los humedales, se dio en las menores cargas hidráulicas y orgánicas, posiblemente al exceso de nitrato N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> presente en el medio filtrante (Vymazal, 2007).

En la Reacción 2 se muestra el proceso de desnitrificación, en el que por cada 1 mg de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> reducido se generan 3.57 mg de alcalinidad, por éste motivo se observa un aumento en el pH a medida que lo hace la carga orgánica; además de aumentar las condiciones anaerobias, lo que genera compuestos orgánicos como metanol (CH<sub>3</sub>OH), etanol (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH) y ácido acético (CH<sub>3</sub>-COOH), que son fuente de carbono para llevar a cabo éste proceso (Claros, 2012).

Reacción 2. Proceso de desnitrificación empelando como fuente principal de carbono el metanol.

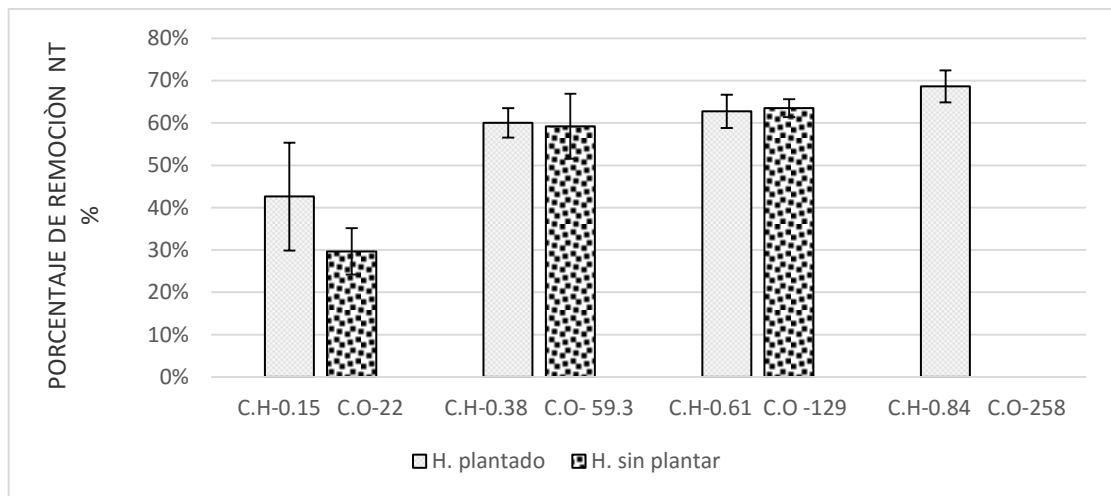


(Claros, 2012).

**6.3.6 Remoción de nitrógeno total.** En lo concerniente al nitrógeno total, se aprecia un aumento progresivo en la eficiencia de remoción ante el aumento de la carga hidráulica y orgánica aplicada, aumentando un 26% en la eficiencia de remoción de NT al pasar de la mínima carga aplicada (C.H de 0.15 m/d y C.O de 22 g DBO<sub>5</sub>/ m<sup>2</sup>d,) a la mayor carga aplicada (C.H 0.84 m / d y C.O de 258g DBO<sub>5</sub>/ m<sup>2</sup> d) para el humedal plantado con *Heliconia psittacorum*; y para el humedal sin plantar en un 33% en la eficiencia de remoción de NT al pasar de la mínima carga aplicada (C.H de 0.15 m/d y C.O de 22 g DBO<sub>5</sub>/ m<sup>2</sup>d) a la mayor carga aplicada (C.H de 0.61 m/d y C.O de 129 g DBO<sub>5</sub>/ m<sup>2</sup>d) como se muestra en Ilustración 20.

De igual forma se evidencia que las cargas optimas en cuanto a la remoción de NT son (C.H 0.84 m / d y C.O de 258g DBO<sub>5</sub>/ m<sup>2</sup> d) en el humedal plantado y para el humedal sin plantar de (C.H de 0.61 m/d y C.O de 129 g DBO<sub>5</sub>/ m<sup>2</sup>d).

Ilustración 20. Porcentaje de remoción NT en las diferentes cargas hidráulicas y orgánicas aplicadas.



C.H .Carga hidráulica ( $m/d$ ) y C.O Carga orgánica ( $g/m^2d$ ).

El aumento en la eficiencia de remoción de NT pudo deberse al exceso en el suministro de carbono al aumentar la carga orgánica, al mismo tiempo, el aumento de la carga hidráulica pudo promover la formación de zonas anaerobias y anóxicas

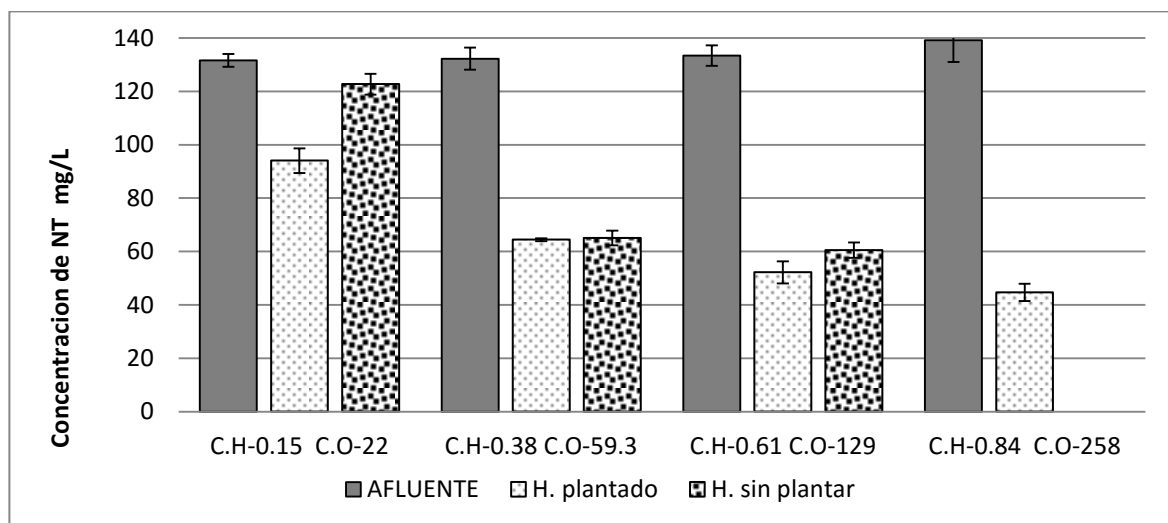


cuando el humedal estaba saturado. Además, el estudio se desarrolló bajo condiciones tropicales, en donde las plantas (*Heliconia psittacorum*) pueden crecer más rápido debido a temperaturas cálidas presentes durante todo el año, lo cual mejora el proceso de remoción, en tanto que las plantas utilizan nitrógeno como nutriente para su metabolismo.

Al comparar el resultado de la eficiencia de remoción de NT en los dos humedales se obtuvieron porcentajes superiores a lo reportado por otros autores, Kim et al, (2015) Dan et al, (2011) y Tanner et al, (2012) que evidenciaron un porcentaje de remoción de NT que vario entre 45% y 59%. En otro estudio, Jia et al, (2010) se mostró que en periodos de inundación aumento la eficiencia de remoción de NT hasta en 67%.

Por otra parte, se constató que el proceso de remoción de nitrógeno total se efectuó a lo largo de todo el estudio, ya que se presentó una disminución significativa en la concentración de NT en los efluentes, al aumento simultáneo de la carga hidráulica y orgánica (Ilustración 21). Siendo las principales vías de remoción la nitrificación, la desnitrificación y posterior acumulación en la biomasa del humedal.

Ilustración 21. Concentración del NT en el afluente y en los efluentes en las diferentes cargas hidráulicas y orgánicas aplicadas.



C.H. Carga hidráulica ( $m/d$ ) y C.O. Carga orgánica ( $g/m^2d$ ).

#### 6.4 Tasa de consumo de oxígeno (TCO)

Se calculó la tasa de consumo de oxígeno (TCO) para los humedales plantado y sin plantar, en cada tratamiento empleado en el estudio; determinándose el (TCO) por medio de los parámetros de  $\text{DBO}_5$  y  $\text{N-NH}_4^+$  empleando la ecuación propuesta por Cooper (2005) como se muestra en la sección 5.6.

Se obtuvieron los siguientes resultados para la tasa de consumo de oxígeno en las diferentes cargas hidráulicas y orgánicas aplicadas.

Tabla 14. Tasa de consumo de oxígeno en las diferentes carga hidráulicas y orgánicas aplicadas

Carga hidráulica m/d	Carga orgánica g/m <sup>2</sup> d	Tasa de consumo de oxígeno	
		H. Plantado g O <sub>2</sub> / m <sup>2</sup> d	H. Sin plantar g O <sub>2</sub> / m <sup>2</sup> d
0.15	22	79.7	67.6
0.38	59	153	158
0.61	129	296	227
0.84	258	484	

Según los resultados presentados en la Tabla 14, las tasas de consumo de oxígeno calculadas son mayores en el humedal plantado con *Heliconia psittacorum*, que en el humedal sin plantar. Resultados similares a los obtenidos por Nivala et al, (2013) en cuanto al humedal plantado se obtuvo una mayor tasa de consumo de oxígeno debido a que la vegetación mejora la transferencia de oxígeno en el interior humedal.

Por otro lado, la tasa de consumo de oxígeno aumentó con el aumento de la carga hidráulica y orgánica aplicada, obteniendo resultados mayores a los reportados por Kantawanichkul et al, (2009), en cuyo estudio se obtuvieron TCO de 80 g O<sub>2</sub> / m<sup>2</sup> d en el humedal plantado y en el humedal sin plantar de 60 g O<sub>2</sub> / m<sup>2</sup> d para la mayor carga hidráulica aplicada (80 mm / d).

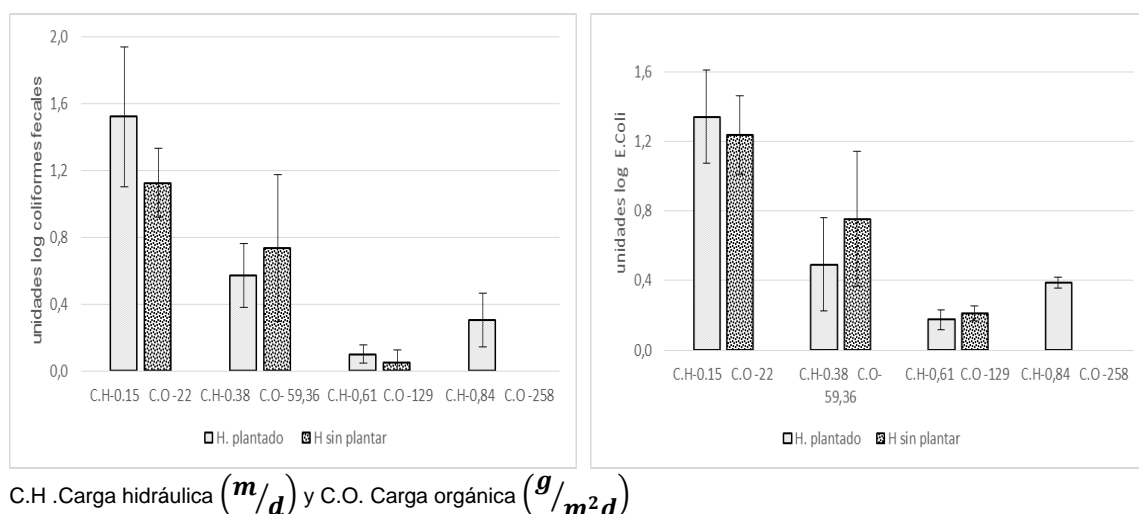
Lo anterior indica que, en este caso, el oxígeno disponible no representó un factor limitante en la remoción de carga contaminante. En contraste, es probable que la remoción de contaminantes se vea limitada por la disminución en tiempo de contacto del agua residual doméstica con el medio filtrante.

#### 6.5 Remoción de patógenos

Los indicadores microbianos con los cuales se cuantificó la contaminación fecal en fuentes de aguas residuales fueron la *Escherichia coli* (*E.coli*) y coliformes fecales

(CF), útiles para identificar el proceso de eliminación en los humedales. Los resultados obtenidos en este estudio mostraron que las cargas óptimas fueron: (C.H 0.15 m / d y C.O 22 g / m<sup>2</sup> d) en la remoción de patógenos, como se presenta en la Ilustración 22.

Ilustración 22. Remoción de coliformes fecales y *E.coli* en unidades logarítmicas.



La eliminación de estos microorganismos patógenos, posiblemente se llevó a cabo por diferentes mecanismos tales como: mortandad natural, sedimentación, filtración, adsorción y depredación (Boutilier et al., 2010). Así mismo, la remoción se vio influenciada por diferentes parámetros como la carga hidráulica, la carga orgánica y el pH. Sin embargo, no se observaron grandes diferencias en la eficiencia de eliminación de patógenos en los humedales plantados y sin plantar.

La aplicación de altas cargas hidráulicas al sistema causa una reducción en la eficiencia de la eliminación de coliformes fecales, posiblemente debido a la obstrucción de los poros del medio. Además, al poseer tiempos cortos en las frecuencias de alimentación disminuye la exposición de las bacterias a los procesos de eliminación, tales como: la sedimentación, la adsorción, la depredación y el impacto de las toxinas por microorganismos o la vegetación (Díaz et al., 2010).

Al aumentar la carga orgánica en los dos humedales, también, aumentó la concentración de nutrientes presentes en el agua residual, los cuales proporcionaron las condiciones adecuadas para llevar a cabo el metabolismo microbiológico de los agentes patógenos (*E. coli* y coliformes fecales); además, el aumento en el contenido de sólidos en el medio filtrante, aumenta la supervivencia de las bacterias patógenas lo que disminuye la eficiencia en la remoción.

Los valores de pH en la CH 0.15 m / d C.O 22 g / m<sup>2</sup> d, arrojaron resultados en los efluentes de 4.48 para el humedal plantado, y de 4.67 para el humedal sin plantar, este resultado se debe al rápido proceso de nitrificación. Estos valores de pH posiblemente contribuyeron a la reducción de la *E.coli* y coliformes fecales presentes en el agua residual doméstica. Como se evidencia en el estudio Pundsack et al., (2001), los cuales reportaron que a bajos valores de pH entre 3.7 a 4.7 ayudaron a la reducción de microorganismos patógenos.

## 6.7 Colmatación de los humedales

Al comienzo del funcionamiento de los dos humedales, bajo las primeras cargas hidráulicas y orgánicas aplicadas, se presenta un periodo óptimo, donde el contenido de la materia orgánica y sólidos suspendidos fue retirada fácilmente por medio de los procesos físicos, químicos y biológicos (García et al, 2010). La eliminación de éstos materiales produjo sólidos inmóviles y sedimentación de biomasa microbiana en el medio filtrante (Hua et al., 2010), los cuales redujeron y bloquearon los espacios entre los poros del medio filtrante del humedal, generando progresivamente la compactación de éste (Ilustración 24).

De acuerdo con lo anterior, al aumentar la carga hidráulica y orgánica, al punto de su sobrecarga, aumenta rápidamente el contenido de materia orgánica acumulada (ácidos húmicos, humina, fúlvicos y derivados de compuestos lignocelulósicos) (Winter y Goetz, 2003), el crecimiento microbiano y la concentración de sólidos suspendidos en los primeros centímetros del medio (Knowles et al, 2011), reduciendo en forma efectiva la conductividad hidráulica y el contenido de oxígeno en el medio (Langergraber et al, 2008); trayendo como consecuencia la disminución en la capacidad degradadora de los contaminantes presentes, por medio de la actividad microbiana aeróbica.

Ilustración 23. Proceso de colmatación a las diferentes cargas aplicadas en el humedal.



Donde **C.H 15 m/d C.O 22g/m<sup>2</sup>d** representa la fase de eliminación de contaminantes, **C.H 0,38 m/d C.O 59,3 g/m<sup>2</sup>d** donde se observa el encharcamiento del medio de soporte y **C.H 61 m/d C.O 129 g/m<sup>2</sup>d** la compactación del medio como consecuencia del aumento de la carga hidráulica y orgánica. Por el ultimo el aislamiento del humedal.

El medio se encontró totalmente obstruido a una C.H de 0.61 m / d para el humedal sin plantar y de C.H de 0.84 / d para el humedal plantado, creando un ambiente anaerobio donde se suprimió en cierta forma las actividades aeróbicas, observando encharcamiento, olores y presencia de insectos en la superficie del medio (Álvarez et al, 2008), como consecuencia de la falla hidráulica y por ende se creó una mayor contaminación en los humedales.

En cuanto a las cargas hidráulicas donde se observaron las fallas en los dos humedales son congruentes con las mostradas por diferentes autores, como Wu et al ( 2015) que sugirieron una tasa hidráulica menor a 0.5 m / d para humedales de flujo subsuperficial. Paing et al, (2015) recomienda cargas inferiores a 0.6 m / d y Torrens et al (2009) no superiores a 0.8 m / d; para así tener un buen funcionamiento de los humedales, evitar las fallas hidráulicas y la disminución en el rendimiento de eliminación de los diferentes contaminantes.

Con respecto a la carga orgánica, las superficies de ambos humedales mostraron obstrucciones; el humedal sin plantar a la C.O de 129 g DBO<sub>5</sub> / m<sup>2</sup> d y en el humedal plantado de C.O de 258 g DBO<sub>5</sub> / m<sup>2</sup> d, lo que se confirma con lo mostrado por Nivala et al, (2012) donde recomienda que la carga de DBO<sub>5</sub> debe ser inferior a 250 g / m<sup>2</sup> d para evitar el corto circuito en la alimentación, el deterioro del tratamiento y la reducción drástica de la vida útil del humedal.

#### ✓ **Efecto de la *Heliconia psittacorum* en el proceso de colmatación del humedal**

Se encontró que el humedal plantado con *Heliconia psittacorum*, mitigó mejor el proceso de obstrucción del medio a mayor carga hidráulica y orgánica, con respecto al humedal sin plantar, debido a que sus raíces pudieron penetrar y aflojar la matriz del medio, mejorando con ello la porosidad y logrando ralentizar la obstrucción del humedal, siendo así que el humedal plantado con *Heliconia psittacorum* soportó una C.H de 0.84 m / d y de C.O de 258 g / m<sup>2</sup> d mientras que el humedal sin plantar se colmató con una C.H de 0.61m / d y una C.O de 129 g / m<sup>2</sup> d.

Situación similar a lo mostrado por Molle et al, (2006) que al trabajar con cargas hidráulicas entre 1-2 m / d, observó que los humedales plantados con caña mitigan el efecto de sobrecarga y mejoran la conductividad hidráulica y la degradación microbiana de la materia orgánica y, por Fu et al, (2013) donde mostró que los humedales plantados con *Canna* y *Cyperus alternifolius*, amortiguan el proceso de obstrucción del medio.

#### ✓ **Otros factores que influyen en la colmatación de los humedales**

Otros factores que sustentan el deterioro en la eficiencia de los humedales, por el aumento de la carga hidráulica, es **la constante de velocidad de eliminación**

de los diferentes contaminantes, además de **los periodos de reposo entre los pulsos aplicados.**

**La constante de velocidad de eliminación K** se calculó empleando la ecuación propuesta por (Kadlec & Knight, 1996) (sección 5.7) para los parámetros de DQO, DBO<sub>5</sub> SST y N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>. La K para los diferentes parámetros aumentó a medida que lo hicieron las cargas hidráulicas aplicadas, tanto en el humedal plantado como en el humedal sin plantar, como se muestra en la Tabla 15.

Tabla 15. Constante de velocidad de eliminación de los diferentes contaminantes a las diferentes cargas hidráulicas y orgánicas aplicadas.

CONSTANTE DE VELOCIDAD K (m / año)								
C.H	N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>		DQO		DBO <sub>5</sub>		SST	
m/d	H. plantado	H. sin plantar	H. plantado	H. sin plantar	H. plantado	H. sin plantar	H. plantado	H. sin plantar
	m/año							
0.15	77.8	56.3	108	93.9	112	110	53.3	50.9
0.38	140	133	208	243	162	201	122	104
0.61*	239	225	350	261	275	76.7	231	168
0.84*	281	-	273	-	229	-	361	-

Representa la K de velocidad de eliminación en la fase de sobre carga para el humedal sin plantar, ♦ Representa la K de velocidad de eliminación en la fase de sobre carga para el humedal sin plantar. Los espacios en las últimas celdas del humedal sin plantar se presentan debido a que en carga 0.84 m/d el sistema no estaba funcionando.

Sin embargo, en el humedal sin plantar el valor de la K para los parámetros de DQO y SST permaneció constante al llegar a la carga hidráulica donde el humedal se colmató (C.H 0.61m/d); en cuanto a la DBO<sub>5</sub> el valor de la K disminuyó en esta fase del humedal.

En el humedal plantado con *Heliconia psittacorum*, el valor de la K para los parámetros DQO y DBO<sub>5</sub> decreció al llegar a la fase de colmatación (C.H 0.84m/d), en cuanto a la K N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> no presento variaciones en esta fase del tratamiento (Tabla 15). Lo que indica que para estos parámetros tanto en el humedal plantado como en el humedal sin plantar alcanzaron la velocidad de reacción máxima. Además, se ratifica con el aumento en las concentraciones de contaminantes en los efluentes y en el deterioro de los humedales.

Los valores de la K son mayores a los reportados por otros estudios, debido a que la K depende de carga hidráulica aplicada. Dan (2011) reportó una máxima

$K_{\text{DBO}_5}$  100 m / año,  $K_{\text{DQO}}$  de 86 m/año para las cargas hidráulicas entre (C.H 0.16 – 0.35) m / d. Kantawanichkul et al,( 2009) reportaron  $K$  máxima para DQO de 49 m / año.

✓ **Periodos de reposo entre los pulsos aplicados**

Al aumentar la carga hidráulica, disminuye el tiempo de reposo entre los pulsos, reduciendo el contacto entre los contaminantes y el sistema, causando una disminución en la depuración del agua residual por el humedal. En el estudio se estimó un tiempo de reposo de 6 horas para la carga hidráulica mínima (C.H de 0.15 m/d) entre pulso y pulso, y un tiempo de 1 hora y 30 minutos para la carga hidráulica máxima aplicada (C.H de 0.84m/d). Los parámetros que se vieron principalmente afectados por la disminución de tiempo de reposo entre los lotes al aumentar la carga hidráulica fueron: la formación de  $\text{N-NO}_3^-$ , la remoción de  $\text{DBO}_5$  y la remoción de patógenos (coliformes fecales y *E.Coli*).

## 6.8 ¿Cuál es el sistema óptimo?

De acuerdo a los objetivos planteados en el presente estudio, y a los resultados obtenidos en la remoción de contaminantes presentes en el agua residual doméstica, se muestran las cargas óptimas recomendables para la remoción de los diferentes parámetros como se muestra en la Tabla 16 y en la Tabla 17.

### ✓ Según la resolución 0631 de 2015 en la remoción de DQO y SST

Con base en la resolución 0631 de 2015 sobre vertimientos, las cargas óptimas se muestran en la Tabla 16 tanto del humedal plantado con *Heliconia psittacorum*, como del humedal sin plantar.

Tabla 16. Cargas óptimas de los humedales flujo vertical para la remoción de DQO Y SST según la normativa 0631

HUMEDAL PLANTADO CON <i>Heliconia psittacorum</i>						
Parámetros	C.H óptima m/d	C.O óptima g/m <sup>2</sup> d	eficiencia de remoción	Carga removida g/m <sup>2</sup> d	concentración en el efluente mg O <sub>2</sub> /L	Concentración según la resolución 0631 Colombiana
<b>DQO</b>	0.84	258	63%	214	161	200 mg O <sub>2</sub> /L
<b>SST</b>	0.84	258	74%	62.2	25.6	90 mg O <sub>2</sub> /L
<b>Observación.</b> Estos valores de C.H y C.O corresponden a aquellos en que se presenta la colmatación en el humedal. Para evitar éste problema se recomienda la C.H 0,61 m/d y C.O 129 g/m <sup>2</sup> d						

HUMEDAL SIN PLANTAR						
Parámetros	C.H óptima m/d	C.O óptima g/m <sup>2</sup> d	eficiencia de remoción	Carga removida g/m <sup>2</sup> d	concentración en el efluente mg/L O <sub>2</sub>	Concentración según la resolución 0631 Colombiana
<b>DQO</b>	0.61	129	79%	180	125	200 mg/L O <sub>2</sub>
<b>SST</b>	0.61	129	62%	35.1	20.5	100 mg/L
<b>Observación.</b> Estos valores de C.H y C.O corresponden a aquellos en que se presenta la colmatación en el humedal. Para evitar éste problema se recomienda la C.H 0,38 m/d y C.O 59 g/m <sup>2</sup> d						



✓ ¿Cuál es el sistema óptimo en la remoción de  $\text{DBO}_5$ ,  $\text{N-NH}_4^+$ ,  $\text{N-NO}_3^-$ , NT y coliformes fecales y E.coli?

La carga hidráulica y la carga orgánica óptima para las remociones de  $\text{DBO}_5$ ,  $\text{N-NH}_4^+$ ,  $\text{N-NO}_3^-$  y NT se muestran en la Tabla 17, tanto en el humedal plantado con *Heliconia psittacorum*, como en el humedal sin plantar

Tabla17. Cargas optimas de los humedales flujo vertical para la remoción de  $\text{DBO}_5$ ,  $\text{N-NH}_3^+$ ,  $\text{N-NO}_3^-$ , NT

HUMEDAL PLANTADO <i>Heliconia psittacorum</i>					
parámetros	C.H optima m/d	C.O optima g/m <sup>2</sup> d	eficiencia de remoción	Carga removida g/m <sup>2</sup> d	concentración en el efluente mg O <sub>2</sub> / L
<b>DBO<sub>5</sub></b>	0.61	129	73%	94.8	60.5
<b>Observación:</b> Res. 0631-2015 para vertimientos del alcantarillado a cuerpo de agua superficial límite máximo permisible 90 mgO <sub>2</sub> /L.					
<b>N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup></b>	0.84	258	70%	82.9	43
<b>Observación.</b> Estos valores de C.H y C.O corresponden a aquellos en que se presenta la colmatación en el humedal.					
<b>N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	0.15	22	-	-	63
<b>Observación.</b> Siendo ésta la menor C.H y C.O aplicada a el humedal					
<b>NT</b>	0.84	129	69%	80,78	44
<b>Observación.</b> Estos valores de C.H y C.O corresponden a aquellos en que se presenta la colmatación en el humedal.					

HUMEDAL SIN PLANTAR					
parámetros	C.H optima m/d	C.O optima g/m <sup>2</sup> d	eficiencia de remoción	Carga removida g/m <sup>2</sup> d	concentración en el efluente mg/L O <sub>2</sub>
<b>DBO<sub>5</sub></b>	0.38	59	79%	46.4	42.2
<b>Observación:</b> Res. 0631-2015 para vertimientos del alcantarillado a cuerpo de agua superficial límite máximo permisible 90 mgO <sub>2</sub> /L.					
<b>N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup></b>	0.61	129	70%	55.8	48
<b>Observación.</b> Estos valores de C.H y C.O corresponden a aquellos en que se presenta la colmatación en el humedal					
<b>N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	0.15	22	-	-	75
<b>Observación.</b> Siendo ésta la menor C.H y C.O aplicada a el humedal.					
<b>NT</b>	0.61	129	63%	50.2	60.5
<b>Observación.</b> Estos valores de C.H y C.O corresponden a aquellos en que se presenta la colmatación en el humedal.					

La carga hidráulica 0.5 m / d y la carga orgánica 22 g / m<sup>2</sup> d fueron óptimas para la remoción de coliformes fecales y *E.coli*, tanto en el humedal plantado con *Heliconia psittacorum*, como del humedal sin plantar.

✓ **Influencia de la vegetación y de las condiciones tropicales en la remoción de contaminantes**

***Heliconia psittacorum***

De acuerdo a los objetivos planteados en el estudio, se observó que bajo condiciones tropicales, y el aumento de las cargas hidráulicas y orgánicas, el sistema que mitigó mejor el efecto de obstrucción fue: el humedal plantado, llegando hasta una carga hidráulica de 0.84m/d y orgánica de 258g/m<sup>2</sup>d.

La *Heliconia psittacorum* presentó alta resistencia al aumento de la carga hidráulica y orgánica, tolerando concentraciones de DQO hasta del 408 mg / L sin presentar cambios fisiológicos aparentes. Además, soportó altas concentraciones de nitrógeno, tanto en forma amoniacal N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 120 mg / L como de nitrato N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 63 mg / L, sin evidenciar sintomatología aparente de necrosis, clorosis o disminución en el crecimiento.

Xu et al, (2010) mostró que la necrosis, clorosis o disminución en el crecimiento son los principales síntomas causados por una alta concentración de amoníaco en el medio. Otros estudios, han mostrado que diferentes plantas empleadas en la depuración de contaminantes tienen la capacidad de tolerar niveles altos de concentraciones de amoníaco como la *T. Latifolia* que tolero un promedio de 160-170 mg / L, (Surrency, 1993), mientras que *S. validus* entre 20,5 y 82,4 mg / L (Hill et al, 1997).

✓ **Condiciones tropicales**

El estudio se realizó bajo condiciones tropicales, donde la temperatura estuvo alrededor de 24 °C (*Tiempo meteorológico Pereira*, CO, 2015) a lo largo de todo el estudio. La temperatura al encontrarse dentro del rango de 15 a 25 °C fue propicia para que se presentara una mayor actividad biológica (Vymazal 2005), por ende, mayor eficiencia en el tratamiento en comparación a los resultados reportados bajo condiciones templadas. Además, las regiones tropicales se caracterizan por presentar alta humedad y un flujo relativamente estable de energía solar durante todo el año (Zhang et al, 2015), las cuales tuvieron un efecto positivo en la remoción de materia orgánica, nitrógeno total y microorganismos patógenos como se observaron en las secciones 6.3.1, 6.3.6 y 6.5.

En cuanto al diseño y la operación de los humedales de flujo vertical bajo condiciones tropicales soportaron mayores cargas hidráulicas y orgánicas en comparación con las reportadas para climas templados. Lo que conlleva, a que

un ambiente tropical puede tener un efecto importante sobre el funcionamiento de los humedales de flujo vertical para la depuración de aguas residuales domésticas. También, bajo estas condiciones tropicales, se favoreció el crecimiento de la *Heliconia psittacorum*.

## 7. CONCLUSIONES

- ✓ En la eliminación de materia orgánica y sólidos suspendidos totales la carga óptima para el humedal plantado con *Heliconia psittacorum* fue de C.H 0.84 m / d y C.O 258 g / m<sup>2</sup> d y para el humedal sin plantar fue de C.H 0.61 m / d y C.O 129 g / m<sup>2</sup> d, obteniendo bajas concentraciones de estos parámetros en los efluentes, con respecto a las concentraciones reportadas en la resolución 0631 de 2015.
- ✓ La máxima carga soportada por los humedales de flujo vertical bajo condiciones tropicales, de diseño y operación fueron de C.H 0.84 m / d y C.O 258 g / m<sup>2</sup> d para el humedal plantado y de C.H 0.61 m / d y C.O de 129 g / m<sup>2</sup> d para el humedal sin plantar, evitando así problemas de colmatación o disminución en el rendimiento de los humedales, siendo éstas cargas mayores a las reportadas en estudios realizados bajo condiciones de climas templados.
- ✓ La eficiencia en la remoción de nitrógeno como amonio, fue constante a lo largo de todo el estudio, tanto del humedal plantado con *Heliconia psittacorum* como el humedal no plantado, sin importar el aumento de la carga hidráulica y orgánica aplicada.
- ✓ En este estudio la eficiencia de remoción y la carga removida de nitrógeno total fueron más altas que las reportadas en otros estudios para humedales de flujo vertical. Es así, que en el humedal plantado fue del 69% y una remoción en carga contaminante del 80 g / m<sup>2</sup> d a una C.H 0.84 m / d y C.O 258 g / m<sup>2</sup> d, y en el humedal sin plantar del 63% y una remoción en carga contaminante del 50 g / m<sup>2</sup> d a una C.H 0.61 m / d y C.O 129 g / m<sup>2</sup> d.
- ✓ Los humedales fueron óptimos a bajas cargas hidráulicas y orgánicas aplicadas (C.H 0.15 m / d C.O de 22 g / m<sup>2</sup> d) en la remoción de *E. coli* y coliformes fecales. Además, en estas cargas se observó un aumento más pronunciado en la formación de nitratos con respecto a las demás cargas aplicadas, debido a las condiciones aerobias que presentaron.
- ✓ Cuando los humedales se colmataron completamente, se redujo drásticamente la eficiencia de remoción en materia orgánica y patógena. Sin embargo, se siguió observando efluentes con bajas concentraciones de contaminantes.

- ✓ En el humedal plantado la *Heliconia psittacorum* jugó un papel importante en cuanto a la acumulación de materia orgánica, ralentización de la colmatación del humedal, debido a la penetración de las raíces a través de medio poroso y el aumento en la absorción de contaminantes presentes en el agua residual doméstica.
- ✓ La *Heliconia psittacorum* creció muy bien a lo largo de todo el estudio y presentó alta tolerancia a contaminantes orgánicos y a compuestos nitrogenados, sin presentar ningún cambio aparente en su fisiología, a pesar de las altas cargas hidráulicas y orgánicas aplicadas.
- ✓ El estudio ha demostrado la viabilidad en la implementación de humedales de flujo vertical para la depuración de aguas residuales domésticas, incluso a altas cargas hidráulicas y cargas orgánicas bajo condiciones tropicales.

## 8. RECOMENDACIONES

- ✓ Es recomendable realizar seguimientos y mantenimientos continuos por lo menos dos o tres veces por semana a los humedales; sin descuidar que aplica el mismo cuidado al sistema de riego y tuberías, con el propósito de evitar fallas hidráulicas (colmatación), y posible presencia de plagas o plantas invasoras.
- ✓ Para estudios posteriores, sería interesante la implementación de sistemas híbridos (H.Vertical- H.Horizontal) o de humedales verticales oxigenados para mejorar la remoción tanto de materia orgánica como de nitrógeno total. También, del Análisis de la *Heliconia psittacorum* como tal, para establecer con certeza el potencial que presenta en la remoción de contaminantes.

## BIBLIOGRAFÍA

Albuquerque, A., Oliveira J., Semitela S., Amaral L. (2009). Influence of bed media characteristics on ammonia and nitrate removal in shallow horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Bioresour. Technol.*, 6269–6277.

Altamarino, N.C.(2009). reducción de la carga orgánica en aguas residuales en una planta industrial mediante la aplicación de la reacción de fenton.

Álvarez, JA., Ruíz, I., Soto, M. (2008). Anaerobic digesters as a pretreatment for constructed wetlands. *Ecol. Eng*, 33. , 54–67.

APHA. (American Public Health Association), AWWA (American Water Works Association), WEF (Water Environment Federation). (2012). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. En A. W. Assn (22<sup>nd</sup> Ed.).

Area, M., Ojeda, S., Barboza, O y Bengoechea, D. (21 de 10 de 2013). Tratamientos aplicables para la reducción de la DQO recalcitrante de efluentes pulpados quimimecánicos y semiquímicos (revisión). *ciencia y Tecnología*.

Arias, C., y Brix, H. M. (2005). Recycling of treated effluents enhance removal of total nitrogen in vertical flow constructed wetlands. J. Environ. Sci. Health Part A: Toxic/Hazard. *Environ. Eng*, 40, 1431–1443.

Arroyave, A., y Castaño, J. (2009). Efectos del tipo de vegetación y de las variaciones de profundidad en la eficiencia de remoción de patógenos en humedales construidos de flujo subsuperficial. Grupo de investigación aguas y aguas de Pereira- Colombia.

Ascúntar R., y Toro V. (2007). Estudio del comportamiento hidrodinámico de humedales de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales domésticas. *trabajo de grado -ingeniería sanitaria*, univalle-Cali- Colombia.

Ávila, C., Nivala J., Olsson L., Kassa K., Headley T. (2014). Emerging organic contaminants in vertical subsurface flow constructed wetlands: Influence of media size, loading frequency and use of active aeration. *Science of The Total Environment*, 211–217.

Báez, J. N. (1995). Tratamiento básico de aguas residuales. *Barranquilla : Ediciones Uninorte*, ISBN 985-9105-39-4.

Bastian, R.K. y Hammer, D.A., (1993). The use of Constructed Wetlands for Wastewater Treatment and Recycling, in Moshiri, G.A., Constructed Wetlands for water Quality Improvement. *Lewis Publishers, Chelsea, MI*.

Bohórquez, E, y Paredes, D (2015). Efectos del medio filtrante y la frecuencia de alimentación en humedales contruidos de flujo vertical para tratamiento de aguas residuales domésticas en condiciones tropicales. *presentado como Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Ciencias Ambientales. Requisito parcial de los requerimientos necesarios para obtener el título de Magister en Ecotecnología.*

Boutilier, L., Jamieson, R., Gordon,R., Lake,C., Hart,W. (2009). Adsorption, sedimentation, and inactivation of E. coli within wastewater treatment wetlands. *Water Res*, 4370–4380.

Boutilier .L (2010). Performance of surface-flow domestic wastewater treatment wetlands. *Wetlands* , 795–804.

Brix, H., Arias, C. (2005). The use of vertical flow constructed wetlands for on-site treatment of domestic wastewater: New Danish guidelines. *Ecol. Eng.*, 491 - 500.

Brix,H. (1997). Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands? *Water Sci. Technol*, 11 - 17.

Calheiros, C., Rangel, A., Castro, P (2007). Constructed wetland systems vegetated with different plants applied to the treatment of tannery wastewater. *Water Research*, 1790–1798.

Campos, S., & Lopera, M. (2011). Desarrollo de capacidades en el uso seguro de aguas residuales para agricultura. Ministerio de Agricultura y Desarrollo rural. República de Colombia, 4-5.

CDWT. (2009). *Desentralized wasterwater glossary*. Recuperado el 23 de 8 de 2015, de <http://www.onsiteconsortium.org/glossary.html>

Claros, J. (2012). estudio del proceso de nitrificación y desnitrificación vía nitrito para el tratamiento biológico de corrientes de agua residual con alta carga de nitrógeno AMONIACAL. *universiad politecnica de valencia, para optar por el titulo doctoral departamento de ingeniería hidráulica y medio ambiente* .

Cooper, P.F. (2005). The performance of vertical-flow constructed wetland systems with special reference to the significance of oxygen transfer and hydraulic loading rate. *Water Sci. Technol*, 81-90.

Crites, R., y Tchobanoglous, G. (2000). *Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones, primera edición*. editorial McGraw-Hill S.A. 35-68 pág.

Cubillos, J. (2011). Evaluación de la fitorremediación como alternativa de tratamiento de aguas contaminadas con hidrocarburos. *UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA -MAESTRÍA EN ECOTECNOLOGÍA.*



Dan T.H., Quang L.Q., Chiem N.C, Brix, H. (2011). Treatment of high-strength wastewater in tropical constructed wetlands planted with *Sesbania sesban*: horizontal subsurface flow versus vertical downflow. *Ecological Engineering*, 37 (5), pp. 711–720.

Delgadillo, O. M. (2008). Zonas húmedas construidas, una tecnología natural para la depuración de aguas residuales con fines de riego en municipios rurales y periurbanos. Salvador Bahia-Brasil.

Diaz. F., O'Geen, A., Dahlgren, R. (2010). Efficacy of constructed wetlands for removal of bacterial contamination from agricultural return flows. *Agric. Water Manag*, 1813–1821.

Díaz, C. A y Romero, J. (2013). Evaluación de la remoción de DBO, DQO, SST, NTK,PT y CF en un humedal de flujo subsuperficial construido con carbón mineral y cultivado con *Zantedeschia aethiopica*. . *Escuela Colombiana de Ingeniería* ISSN: 0121-5132. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, v. 1 No. 89, 29-37.

Díaz, C. A. (2014). Tratamiento de agua residual a través de humedales. V *Congreso Internacional de Ingeniería Civil, Universidad Santo Tomás Seccional Tunja*.

Faulwettera, J., Gagnon,V., Sundberg, C., Chazaren, F., Burr M.D., Brisson,J., Camper,A.K., Stein, R.(2009). Microbial processes influencing performance of treatment wetlands: A review. *Ecological Engineering*, 987–1004.

Fu G., Zhang J., Chen, W., Chen, Z., (2013). Medium clogging and the dynamics of organic matter accumulation in constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 393–398.

García, J., Rousseau, D. P. L., Morató, J., Lesage, E., Matamoros, V., y Bayona, J. M. (2010). Contaminant Removal Processes in Subsurface-Flow Constructed Wetlands: A Review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 40(7), 561 –661

García, J., y Corzo, A. (2008). Depuracion con humedales construidos. Guia practica de deseño,construccion y explotacion de sistemas de humedales de flujo subsuperficial. *Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental. Universidad Politécnica de Cataluña*.

Grant, S. (1996. ). Prevalence of enterohemorrhagic *Escherichia coli* in raw and treated municipal sewage. *Apply and Environmental Microbiology*, 62, 3466-3469.

Hill, D.T., Payne, V.W.E., Rogers, J.W., Kown, S.R., (1997). Ammonia effects on the biomass production of five constructed wetland plant species. *Bioresour. Technol*, 109-113.

Hua, G.F., Zhu, W., Zhao, L.F., Huang, Y.J. (2010). Clogging pattern in vertical-flow constructed wetlands: Insight from a laboratory study. *Journal of Hazardous Materials*, 668–674.

IDEAM TI0187 . (2007). TOMA DE MUESTRAS DE AGUAS RESIDUALES. *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales*.

Ingeniería de Tratamiento Acondicionamiento de Aguas. (2000). Parámetros y Características de las Aguas Naturales.

Jia, W., Zhang, J., Wu, J., Xie, H., y Zhang, B. (2010). Effect of intermittent operation on contaminant removal and plant growth in vertical flow constructed wetlands: A microcosm experiment. *Desalination*, 262(1 -3), 202–208.

Kadlec, R., y Knight, R. (1996). Treatment Wetlands. *Lewis Publishers, Boca Raton, New York, London, Tokyo* .

Kadlec, R., y Wallace, S. (2009). Treatment Wetlands. *Second edition CRC Press, Taylor y Francis* Kantawanichkul, S., Kladprasert, S., y Brix, H. (2009a). Treatment of high-strength wastewater in tropical vertical flow constructed wetlands planted with *Typha angustifolia* and *Cyperus involucratus*. *Ecological Engineering*, 35(2), 238–247. *s Group, New York*.

Kantawanichkul, S. K. (2009). Treatment of high-strength wastewater in tropical vertical flow constructed wetlands planted with *Typha angustifolia* and *Cyperus involucratus*. *Ecological Engineering*, 238–247.

Karathanasis et al, C. P. (2003). Vegetation effects on fecal bacteria, BOD, and suspended solid removal in constructed wetlands treating domestic wastewater. *Ecol. Eng.*, 20 (2) , 157–169.

Katayon, S., Z. Fiona, M. N. (2008). Treatment of mil domestic wastewater using subsurface constructed wetlands in Malaysia. *International Journal of Environmental Studies*, 87 - 102.

Kim B., Gautier M., Molle P., Michel P., Gourdon, R. (2015). Influence of the water saturation level on phosphorus retention and treatment performances of vertical flow constructed wetland combined with trickling filter and FeCl<sub>3</sub> injection. *Ecological Engineering*, 53-61.

Knowles, P., Dotro G., Nivala J., García, J., (2011). Clogging in subsurface-flow treatment wetlands: Occurrence and contributing factors. *Ecological Engineering*, 60-112.

Lahora, A. (2003). Depuración de aguas residuales mediante humedales artificiales. . *Ecología, manejo y conservación de los humedales. Instituto de Estudios Almerienses*. 49, 99-112.

Langergraber, G., Lerach, K., Pressl, A., Rohrhofer, R., Haberl, R. (2008). A two-stage subsurface vertical flow constructed wetland for high-rate nitrogen removal. *Water Sci. Technol.*, 1881–1887.

Lansing, S., y Martin, J. (2006). Use of an ecological treatment system (ETS) for removal of nutrients from dairy wastewater. *Ecological Engineering*, 235–245.

Lara, J. (2004). Implantación y Evolución de un Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial en Cogua, Cundinamarca, Colombia.

Lara, S.R., y Mazzoco, R.R. (2009). effect of hydraulic and organic loads on the mass removal of a structured packing in a trickling filter. *revista mexicana de ingeniería química*, 101-109.

Llagas, W., y Guadalupe, E. (2006). *Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM*. Recuperado el 23 de 8 de 2015, de Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM.: [http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/publicaciones/geologia/vol9\\_n17/a11.pdf](http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/publicaciones/geologia/vol9_n17/a11.pdf).

Londoño, C. L., y Marín, V. C. (2009). evaluación de la eficiencia de remoción de materia orgánica en humedales artificiales de flujo horizontal subsuperficial alimentados con agua residual sintética. *Universidad tecnologica de colombia- tesis para optar el título de tecnólogo químico*.

Mena, J. Rodríguez, L. Núñez, J., (2008). *Depuración de aguas residuales con humedales artificiales: ventajas de los sistemas híbridos*. Madrid, España: Congreso Nacional del Medio Ambiente. Cumbre del Desarrollo Sostenible.

Merck Millipore. (114776 | Test Nitritos). *Método fotométrico 0.002 - 1.00 mg/l NO<sub>2</sub>-N 0.007 - 3.28 mg/l NO<sub>2</sub><sup>-</sup> Spectroquant®*. Obtenido de [http://www.merckmillipore.com/CO/es/product/Nitrite-Test,MDA\\_CHEM-114776](http://www.merckmillipore.com/CO/es/product/Nitrite-Test,MDA_CHEM-114776)

Metcalf, y Eddy. (1995). Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización. 3 ed. Madrid: McGraw-Hill, 1995. pág. 505. Vol. 1. ISBN 84- 481-1727-1.

Metcalf, y Eddy. (2003). tratamiento evacuacion y reutilizacion de las aguas residuales . *Cuarta edición, editorial Labor S.A.Barcelona, España.*, 2,69-84 pág.

Millipore, M. (114752 | Test Amonio). *Método fotométrico 0.013 - 3.86 mg/l NH<sub>4</sub><sup>+</sup> Spectroquant®*. Obtenido de [http://www.merckmillipore.com/CO/es/product/Ammonium-Test,MDA\\_CHEM-114752](http://www.merckmillipore.com/CO/es/product/Ammonium-Test,MDA_CHEM-114752)

Ministerio del Medio Ambiente.Guia para la gestion, manejo,tratamiento y disposición final de las aguas residuales minicipales. (2002). bogota.

Molle, P., Liénard, A., Grasmick, A., & Iwema, A. (2006). Effect of reeds and feeding operations on hydraulic behaviour of vertical flow constructed wetlands under hydraulic overloads. *waster research* 40, 606-612.

Moreno L, Fernández M, Rubio J, Calaforra J, López J, Beas J, Alcaín G,Murillo J, Gómez J., (2003). La depuración de aguas residuales urbanas de pequeñas poblaciones mediante infiltración directa en el terreno fundamentos y casos prácticos. *Madrid: Instituto Geológico y minero de España.*, p:23-29.

Nivala, J., Knowles, P., Dotro, G., García, J., Wallace, S, (2012). Clogging in subsurface-flow treatment wetlands:. *Water Research*, 1625-1640.

Nivala J., Wallace. S, Headley, T., Kassa, K., Brix, H., Afferden, M.V., Müller, R. (2013). Oxygen transfer and consumption in subsurface flow treatment wetlands. *Ecological Engineering* , 544–554.

Otálora, A. (2011). Evaluación del sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas mediante humedales artificiales de alta tasa en la locación petrolera de Caño Gandúl. . *Trabajo final de maestría. Universidad Nacional De Colombia.*

Paing P., Guilbert A., Gagnon V., Chazarenc F. (2015). Effect of climate, wastewater composition, loading rates, system age and design on performances of French vertical flow constructed wetlands: A survey based on 169 full scale systems. *Ecological Engineering*, 46–52.

Paredes, D., Kusch, P., Mbwette, T.S.A., Stange, F., Müller, R.A., Köser, H. (2007). New aspects of microbial nitrogen transformations in the context of wastewater treatment – a review. 13 - 25.

Peña-Salamanca, J; Madera A, Sánchez J. (2013). bioprospección de plantas nativas para su uso en procesos de biorremediación: caso heliconia psittacorum (heliconiaceae). *revista de asociacion colombiana de ciencias bioógicas*, 469-481.

Pettecrew, E., y Kalff, J. (1992). Water flow and clay retention in submerged macrophyte bed. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 2483 - 2489.

Prochaska., Zouboulis A.I., Eskridge K.M (2007). Performance of pilot-scale vertical-flow constructed wetlands, as affected by season, substrate, hydraulic load and frequency of application of simulated urban sewage. *ecological engineering*, 57 - 66.

Pundsack, J., Axler, R., Hicks, R., Henneck, J., Nordman, D. (2001). Seasonal pathogen removal by alternative on-site wastewater treatment systems. *Water Environ. Res.*, 204–212.

Ramalho, R. (2003). *Tratamiento de aguas residuales. Segunda edición*,. editorial Reverté. 92-93 pág.

Ramírez, E. R. (2002). caracterización físico-química y biológica de un lecho de macrófitas con pretratamiento anaerobio. . *Facultad de Estudios Superiores Iztacala UNAM*.

Reddy, K., & Patrick, W. (1984). Nitrogen transformations and loss in flooded soils and sediments. *CRC Critical Reviews in Environmental Control*, 273.

Reinoso, R., y Bécares, E. (2008). The occurrence of intestinal parasites in swine slurry and their removal in activated sludge plants. En: *Bioresource Technology* 99 (14), 6661-5. *Bioresource Technology* 99 (14), 6661-5., 99 (14), 6661-5.

Romero, R. (1999). *Calidad del agua. Segunda edición*, editorial Alfa. Alfa Omega. 134,143 pág.

Saeeda, T., y Sunc, G. (2012). A review on nitrogen and organics removal mechanisms in subsurface flow constructed wetlands: Dependency on environmental parameters, operating conditions and supporting media. *Journal of Environmental Management*, Pages 429–448.

Salgot, M., y Torrens, A. B. (2008). Aguas continentales. Gestión de recursos hídricos, tratamiento y calidad del agua. Informes CSIC. *Proyectos y producciones S.A. Madrid*.

Shilton A., y Mara D. 2005. Pond Process Design - A Historical Review. In: *Pond Treatment Technology*, Shilton A. (ed.) IWA Publishing. Londres, Reino Unido

Siachoque, I. J. (2009). Estudio del comportamiento de humedales artificiales de flujo sub-superficial en la planta de tratamiento de Carrion de la Céspedes Sevilla-España . *Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga*.

Starr, F., y Starr, K. (2007). *catalogo de especies SIB- ficha de especie N.986*. Obtenido de <http://www.biodiversidad.co/fichas/986>

Stefanakis, A. I., y Tsihrintzis, V. A. (2012). Effects of loading, resting period, temperature, porous media, vegetation and aeration on performance of pilot-scale vertical flow constructed wetlands. *Chemical Engineering Journal*, 416 -430.

Stottmeister, U. W. (2003). Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment. *Biotechnol. Adv.* 2., 93-117.

Surrency, D. (1993). Evaluation of aquatic plants for constructed wetlands. G.A. Moshiri (Ed.), *Constructed Wetlands for Water Quality Improvement*, Lewis Publishers, Boca Raton., 349–357.

Tanner C., Sukias, J., Headley, T., Yates, C.R., Rebecca Stott, R. (2012). Constructed wetlands and denitrifying bioreactors for on-site and decentralised wastewater treatment: Comparison of five alternative configurations . *Ecological Engineering*, 112-123.

Tanner, C., y Sukias, J. (1995 a). Accumulation of organic solids in gravel-bed constructed wetlands. *Water Sci. Technol.* 229–239, 229–239.

Tietz,A., Kirschner, A., Langergraber, G., Sleytr, K., Haberl,R.(2007). Characterisation of microbial biocoenosis in vertical subsurface flow constructed wetlands. *Sci Total Environ.*, 163–172.

Torrens, A., Molle, P., Boutin, C., Salgot, M. (2009). Impact of design and operation variables on the performance of vertical-flow constructed wetlands and intermittent sand filters treating pond effluent. *Water Research*, 1851–1858.

Truu, M., Juhanson, J., Jaak Truu, J. (2009). Microbial biomass, activity and community composition in constructed wetlands. *Science of The Total Environment*, 3958–3971.

Turon C., Comas, J., Poch, M. (2009). Constructed wetland clogging: A proposal for the integration and. *Ecological Engineering* 35 , 1710-1718.

U.S.EPA. (2000). Design Manual Constructed Wetlands for Municipal Wastewater Treatment, US EPA CERL, Cincinnati, Ohio.

U.S.EPA. (2004). *U.S. Environmental Protection Agency Constructed Treatment Wetlands. EPA 843-F-03-013. Office of Water. August*. Obtenido de <http://www.epa.gov/owow/wetlands/pdf/ConstructedW.pdf>

Vymazal, J. (2007). Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Science of The Total Environment*, 48–65.

Vymazal, J., y Kröpfelová, L. (2009). Removal of organics in constructed wetlands with horizontal sub-surface flow: A review of the field experience. *Science of The Total Environment*, 3911–3922.

Wang, N. K. (2010). Feasibility of using an organic substrate in a wetland system treating sewage sludge: impact of plant species. *Bioresour. Technol.*, 101 , 51–57.

Wei, Z., y Guodong, J. (2012). Constructed wetlands, 1991–2011: A review of research development, current trends, and future directions. *Science of The Total Environment*, 19-27.

Weisner, S. M. (2004). Use of morphological variability in *Cladium jamacense* and *Thypha domingensis* to understand vegetation changes in a. *Everglades marsh. Aquatic Botany.*, (78), 319-335.

Winter, K., y Goetz, D. (2003). The impact of sewage composition on the soil clogging phenomena of vertical flow constructed wetlands. *Water Sci. Technol*, 9-4.

Wua,S., Wallace,S., Brix,H., Kusch, P., Kiruj, W.K., Masi, F., Dong,R. (2015). Treatment of industrial effluents in constructed wetlands: Challenges, operational strategies and overall performance. *Environmental Pollution*, Pages 107–120.

Wu H., Zhang J., Ngo, H., Guo, W., Hu,Z., Liang, S., Fan J., Liu H., (2015). A review on the sustainability of constructed wetlands for wastewater treatment: Design and operation. *Bioresource Technology*, Pages 594–601.

Xu,J., Zhang, J., Xie, H., Li,C., Zhang, C., Shi,Q.(2010). Physiological responses of *Phragmites australis* to wastewater with different chemical oxygen demands. *Ecol. Eng.*, 36, 1341–1347.

Yan, Y., y Xu, J. (2014). Improving winter performance of constructed wetlands for wastewater treatment in Northern China: a review. *Wetlands*, 34, pp. 243–253.

Zhang, D.Q., Jinadasa, K.B.S.N., Gersberg, R., Yu, Liu, Y., Tan, S.K. (2015). Application of constructed wetlands for wastewater treatment in tropical and subtropical regions (2000–2013). *Journal of Environmental Sciences*, 30-46.

Zhi-xin, N. (2007). evaluation of phytoextracting cadmiun and lead by sunflower *ricinus* alfalfa and mustard in hydroponic culture . *journal of enveromental science* , 19 :961-967.